



EESTI MAAÜLIKOOL

Metsandus- ja maaehitusinstituut

**Meelis Linde**

**KIILVAIADE HORISONTAALKANDEVÕIME UURIMINE**

**HORIZONTAL BEARING CAPACITY OF WEDGE SHAPED PILES**

Magistritöö

Maaehituse õppekava

Juhendajad: lektor Villu Leppik

Roomelt Needo

Tartu 2017



Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Meelis Linde		Õppekava: Maaehitus	
Pealkiri: Kiilvaiade horisontaalkandevõime uurimine			
Lehekülgi: 83	Jooniseid: 34	Tabeleid: 6	Lisasid: 4
Osakond: Maaehituse osakond Uurimisvaldkond: Geotehnika Juhendajad: Villu Leppik, Roomelt Needo Kaitsmiskoht ja aasta: Tartu 2017			
<p>Kiilvaiade kasutamist on Eestis uuritud ja propageeritud üle kolmekümne aasta. Kiilvaiade eeliseks teiste vundamentitüüpide ees on väiksem pinnasetööde maht kui lintvundamendil ja väiksem materjali kulu kui plaat- ja vaivundamendil. Täissuuruses kiilvaiade katsetamine on kulukas ja aeganõudev, seega on katsetusteks loodud kiilvaimudelid, mis käituvad pinnases kiilvaiadega samal viisil. Magistritöös otsitakse kiilvaimudelite külgsuunas koormamiseks kuluvat jõudu ja selle jõu suurust võrreldakse kiilvaimudeli vertikaalse kandevõimega homogeenses liivas. Töös on kasutatud varasematest magistritöödest leitud korrelatsioone mudelarvutuste ja staatilistel koormamiskatsetel leitud kandevõimete vahel, mille alusel võrreldakse ka horisontaalsuunalise kandevõime suurust. Töö tulemused leitakse staatiliste ja dünaamiliste koormamiskatsete alusel. Dünaamilisel koormamisel leitakse kiilvaimudelite vertikaalkandevõimed. Staatilistel koormuskatsetel rakendatakse kiilvaiale horisontaalsuunaline koormus ja leitakse mudelite horisontaalne kandevõime. Magistritöö tulemustena selgus kiilvaimudelite vertikaalkandevõime ja horisontaalkandevõime vaheline seos ja pinnasedeformatsioonide ulatus vaia horisontaalsel koormamisel. Katsete tulemusena selgus, et umbes 60 % vertikaalsest kandevõimest võtab kiilvaimudel vastu ka horisontaalsel koormamisel. Erinevalt täissuuruses vaiadega teostatud katsetulemustest on kiilvaimudelite korral otstarbekam vaia horisontaalkandevõime parandamiseks vaia pikkust suurendada. Sarnase mahumuutuse juures on pikkusesse suurendamise tulemusena kandevõime 12 % suurem kui paksusesse suurendatud vaial. Arutelu käigus leiti ka sobivus pinnase külgsurvejõu mudeli alusel kiilvaia horisontaalkandevõimet arvutada. Edaspidised uuringud peaksid hõlmama kiilvaiade paindekandevõimet ja kiilvaialuste horisontaalset kandevõimet.</p>			
Märksõnad: staatiline koormuskatse, passiivsurve, roomepiir, mudelkatset, liiv, Gersevanovi valem, raudbetoonist kiilvai, terasest kiilvai			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Meelis Linde		Specialty: Civil engineering	
Title: Horizontal bearing capacity of wedge shaped piles			
Pages: 83	Figures: 34	Tables: 6	Appendixes: 4
Department: Rural Building Field of research: Geotechnical engineering Supervisors: Villu Leppik, Roomelt Needo Place and date: Tartu 2017			
<p>Wedge shaped piles have been used and researched in Estonia for over 30 years. Wedge shaped pile advantages compared to other commonly used foundation technologies are lesser earthworks than strip foundation and lower material cost than plate and pile foundations. Full sized wedge shaped piles are expensive and time-consuming to experiment on, so smaller test models were constructed, which act the same in soil as full-sized ones. Prime aim for this Master's Thesis is to find the lateral bearing capacity of wedge shaped pile models and to compare that force with the models vertical bearing capacity in homogeneous sand. Thesis is based on correlations found in previous Master's Thesis regarding use of calculus models in comparison to static load experiments. That correlation is also used to evaluate the ratio between wedge shaped pile vertical and horizontal bearing capacities. The results are based on static and dynamic load experiments. Dynamic load experiments set the values for vertical bearing capacities. Static load experiments determine the horizontal bearing capacity of wedge shaped piles. The results of the conducted experiments show the correlation between vertical and horizontal bearing capacities and the extent of soil deformations on horizontal loading. A wedge shaped pile is capable to receive about 60 % of the vertical bearing capacity as the horizontal load. Unlike full-scale wedge pile horizontal loading tests, the wedge pile model gains more horizontal bearing capacity if pile is lengthened rather than widened. Within the same change in volume, lengthening the pile improves horizontal bearing capacity 12 % over widening. During the discussion, a similarity was founded between soil lateral force calculus and experimental horizontal loadbearing capacity. Further researches should include wedge shaped pile bending capacity and horizontal bearing capacity of wedge piled rafts.</p>			
Keywords: static load test, lateral soil pressure, load capacity, model test, Gersevanov formula, reinforces concrete wedge pile, steel wedge pile			

# SISUKORD

Sissejuhatus.....	6
1. Kirjanduse ülevaade.....	9
1.1. Kiilvaivundamendid .....	9
1.2. Kiilvaiade kandevõime hindamine .....	11
1.3. Kiilvaiade horisontaalkandevõime .....	16
1.4. Pinnase käitumine vaiade rammimisel .....	18
2. Materjal ja metoodika .....	20
2.1. Kiilvaimodelite kirjeldus .....	20
2.2. Katsetel kasutatud pinnase kirjeldus .....	23
2.3. Katseseadmestik .....	25
2.3.1. Katseraamistik ja pinnas .....	25
2.3.2. Katseseadmed .....	26
2.4. Katsemetoodika ja katseplaan.....	29
2.4.1. Katsemetoodika.....	29
2.4.2. Katseplaan.....	31
3. Katsetulemused ja analüüs .....	34
3.1. Kiilvaimodelite horisontaalsuunaline kandevõime .....	34
3.1.1. Raudbetoonist kiilvaimodelid .....	34
3.1.2. Terasest kiilvaimodelid .....	40
3.2. Horisontaalkandevõime sõltuvus vertikaalkandevõimest.....	47
3.3. Koormamisel tekkinud pinnasedeformatsioonid.....	51

4. Arutelu .....	55
Kokkuvõte.....	60
Summary .....	62
Kasutatud kirjandus .....	64
Lisad .....	66
Lisa A: Laboripäevik .....	67
Lisa B: Katseprotokollid .....	68
Lisa C: Horisontaalkoormamise tulemuste võrdlus pinnase passiivsurvejõuga .....	79
LISA D: Lihtlitsents .....	83

## SISSEJUHATUS

Kahe kaldtahuga vaiade kasutamine on maailmas vähe levinud. Eestis sai kiilvaiade uurimine alguse kui otsiti alternatiive sügisesel ajal tehtavatele pinnasetöödele. Kiilvaiu on 1970. aastatest uuritud kitsamas ringis ja laiemat kajastamist ei ole antud teema saanud. Seetõttu on projekteerijaid ja ehitajaid, kes ei ole kiilvaiade kasutamise võimaluste, eeliste ja puudustega kursis. Kiilvaiade uurimise juures on ka aspekte, mida ei ole põhjalikult käsitletud tööde mahukuse ja kulukuse tõttu. Üheks selliseks teemaks on kiilvaiade horisontaalsuunaline kandevõime.

Kiilvaiade horisontaalkandevõime varasemal uurimisel, mis teostati kuni kolmemeetriste vaiadega, ilmnisid mitmed probleemid vaiapeadele külgjõu rakendamisel. Vaiu suruti teineteisest eemale, mis tähendas, et vaiad hakkasid ümber oma keskpunkti pöörlema, põhjustades nulljoonest kõrgemal pinnase surumist vaiapeadest eemale ja nulljoonest allpool vaia otsade vahele. Kiilvaiamudelitega on seda katsetust lihtsam läbi viia, vaiapea saab jäigalt kinnitada ja vai ei pääse pinnases pöörlema, koormates pinnast kogu kaldtahuga ühtlaselt. 2015. aastal Erko Varese poolt kaitstud magistritöös leiti korrelatsioon Gersevanovi valemi tõlgenduse ja kiilvaimudeli kandevõime vahel, mis võetakse aluseks ka käesolevas magistritöös. Töö eesmärk on leida kiilvaia horisontaalsuunaline kandevõime vertikaalsuunalise kandevõime suhtes. Eesmärgi saavutamiseks kasutatakse staatilisi ja dünaamilisi koormuskatseid. Erko Varese tööst selgus, et kiilvaiade valdkonda saab uurida mudelkatsete abil ja nende käitumise järgi pinnastes võib teha järeldusi ehituses kasutusel olevate kiilvaiade kohta.

Mudelkatsete tulemusi saab võrrelda Nursi katsepolügoonil teostatud uuringuga. Seejuures tuleb silmas pidada, et koormust ei rakendatud samal viisil. Töös leitakse ka seos vaiale rakendatava külgsurve ja pinnase deformeerumise vahel: kui suures osas pinnase pealiskiht siirdub ja mis nurga all on praod pindmises kihis vaiapea suhtes. Vaia kandevõime sõltub peamiselt koormamissuunaga paralleelselt olevate pindade hõõrdetegurist pinnase suhtes ja vaia ette jääva pinnase välja surumiseks vajaliku jõu suurusest. Lahutades hõõrdejõu suuruse vastavalt liiva ja betooni või liiva ja terase vahel pinnase vastupanust vaiale, on võimalik leida korrelatsioon

pinnase poolt vastuvõetava koormuse ja hõõrdel tekkiva jõu vahel ning võrrelda seda Metsa, Tammemäe ja Väli analüüsiga Nursi katsepolügoonil tehtud katsetest.

Töös võrreldakse tänapäeval ehituses kasutatavate vaiade kandevõimeid ruumalaühiku kohta kiilvaimudelite omaga. Peamiseks kiilvaimudeliks valitud 400 mm kõrgune 60 x 120 mm peaga on viiekordselt vähendatud koopia aktsiaselts Kurmiku poolt kasutatavast kiilvaiast KV20.3. Vaiast on tehtud kitsam, laiem ja pikem versioon, varieerudes paksuselt 30–90 mm ja pikkuselt 400–500 mm, et hinnata vaia mahumuutuste otstarbekust: kas mängib rohkem rolli vaia rammimisel saadav sügavus või vaia kaldpindade suunaline paksus. Vaia horisontaalkandevõime katsetulemusi võrreldakse ka pinnase kül- ehk passiivsurve valemiga.

Kiilvaiade vertikaalkandevõime määramiseks mõõdetakse vaiamudelite sisserammimisel viimase kolme löögi vastete keskmine, mida võrreldakse omakorda Erko Varese magistritöös kasutatud Gersevanovi valemiga. 2015. aastal kaitstud magistritöö staatilise koormuskatse vertikaalkandevõime tulemused langesid arvutusmodeliga 95 % ulatuses kokku. Seetõttu lähtutakse käesolevas töös Varese analüüsis leitud seosest Gersevanovi valemi dünaamilise koormuskatse ja kiilvaimudelite staatilise koormuskatse tulemuste vahel. Töös kasutatatud raudbetoonvaiad on sarnased vaiadele, mida kasutati 2015. aastal kaitstud magistritöös. Terasest kiilvaiad valmistati spetsiaalselt käesolevas töös kasutamiseks. Kui selgub, et kiilvaia horisontaalkoormus on võrreldav pinnase külgsurve arvutusmodelitega olukorras, kus kiilvai koormuse mõjul ei pöörle (ei teki kaldpinnal tõmbe- ja survetsooni), võib kasutada pinnase külgsurve valemit kiilvaiade kandevõime horisontaalkomponendi hindamiseks. Järgmine samm kiilvaiade kandevõime uurimisel on kiilvaia paindekandevõime uurimine ning horisontaal- ja vertikaalkoormuste ühismõju uurimine.

Kiilvaia horisontaalkandevõime kõrval pöörati tähelepanu ka pinnase muutustele koormamise järgselt. Vaadeldakse pinnasesse tekkinud pragusid ja võrreldakse nende ulatust pinnasele kiilvaia kaudu rakendatud koormusega. Kiilvaiade horisontaalkandevõime suurus sõltub kuni proportsionaalsuspiirini umbes 35 % ulatuses vaia pindade ja pinnase vahelisest hõõrdejõust ja ülejäänud osas mängib rolli koormus pinnase väljasurumiseks vaia siirde trajektooriga. Väljasurutava pinnase mahu suurust saab arvutuslikult katselisel teel saadud tulemustega võrrelda, kui on teada pinnase kandevõime ja omadused. Kiilvaia horisontaalsel siirdumisel pinnases on üheks eesmärgiks arvutuslikult võrrelda toimuvat pinnase passiivsurvejõu arvutamise

valemitega. Seose leidmisel on võimalik pakkuda välja tugimüüride arvutamiseks ettenähtud pinnase külgsurvejõu valemite rakendamist ka kiilvaiade horisontaalkandevõime arvutamiseks.

Erko Vares ei leidnud 2015. aastal kaitstud magistritöös korrelatsiooni penetromeetri löökide ja pinnasetiheduse vahel, mistõttu pinnase tihedust vaia rammimise järel ei mõõdetud. Horisontaalsel koormamisel pinnase tiheduse mõõtmine tuleks teostada katse ajal, sest hilisem mõõtmine tulemust ei anna. Katse lõppedes on pinnase kandevõime ammendunud ja praod jooksevad läbi pinnase. Pinnase tiheduse hindamiseks kasutatakse dünaamilisel koormamisel saadud vasteid.



# 1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

## 1.1. Kiilvaivundamendid

Eestis on uuritud püramiidvaiade kasutusvõimalusi madalvundamentide asendajana alates 1970. aastast, eelkõige moreenis ja tihendatavas täitepinnases. Masstootmiseks olid püramiidvaia neli kaldtahku tülkad, mistõttu otsustati vaiale anda tasapinnalise kiilu kuju. Edaspidised uuringud ja kiilvaiade praktiline katsetamine kinnitasid kiilvaia eeliseid seni kasutusel olnud vaiatüüpide (prisma-, püramiidi- ja rombikujuliste) ees. Püramiidvaia kandevõime betoonimahuühiku kohta on suurem kui kiilvaial, kuid kiilvaia on lihtsam valmistada, transportida ja rammida. Kiilvaivundamente hakati Eestis kasutama alates 1978. aastast. [1]

Alates 1981. aastast tegeles kiilvaivundeerimisega Võru Kolhooside Ehituskontori (EKE) eksperimentaaljaoskond ja „EKE Projekti“ Tartu ehitusgeoloogia grupp [2]. 1991. aastaks oli kiilvaiadele ehitatud umbes 80 ehitist, mis asusid põhiliselt Lõuna-Eestis, kuid oli ka üksikuid katseobjekte üle Eesti, enamasti oli tegemist madalate põllumajandushoonetega [1]. 1990. aastate teises pooles hakkas kiilvaivundamente projekteerima ja ehitama aktsiaselts Kurmik. Tootja põhitootevalikus on hetkel üheksa kiilvaia, varieerudes vaia pikkuses, paksuses ja vaia kasutamise otstarbe järgi (joonis 1.1). 2017. aastal tegeleb lisaks Kurmikule kiil- ja prismaatiliste vaiade süvistamisega ka aktsiaselts Savi [3,4]. Aktsiaselts Kurmiku peainseneri Roomelt Needo juhtimisel ehitatakse ja projekteeritakse kiilvaiadele 40–50 ehitist aastas. Nende seas on kaubanduskeskusi, elamuid, kuni kuuekorruselisi kortermaju, 20 meetri kõrguseid tööstus- ja põllumajandusehitisi ning mitmesuguseid tehnoajutisi [3]. Kuna hoone kõrguse kasvades suureneb tuulekoormuse arvelt hoone vundamendi poolt pinnasele ülekantav horisontaalkoormus, on vajalik leida korrelatsioon kiilvaia vertikaal- ja horisontaalkandevõime vahel.

Üldjuhtudel kehtivad kiilvaiadele normid, mis on kaldpindadega vaiade kohta SNiP ja GOST standardites kirjas, puudu on projekteerimis- ja ehitamispraktikast [2].

VAIA TÜÜP	A	B	L
KV15.3F	470	300	1500
KV20.3F	600	300	2000
KV25.3F	730	300	2500
KV30.3F	860	300	3000
KV15.3M24	470	300	1500
KV20.3M24	600	300	2000
KV25.3M24	730	300	2500
KV30.3M24	860	300	3000
KV30.3M2x24-5	860	300	3000

Tähised:

A - Vaiapea laius (mm)

B - Vaia paksus (mm)

L - Vaia pikkus (mm)

Vaia tähise selgitused:

KV - Kiilvai

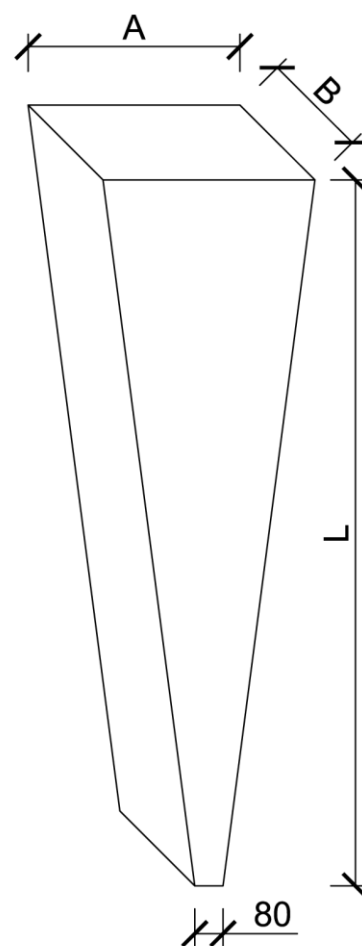
15,20,25,30 - Vaia pikkused (dm)

3 - Vaia paksus (dm)

F - Fiiberbetoon toevai

M24 - Keermestatud pesaga M24 paindevai

M2x24-5 - Paindevai kahe keermestatud pesaga (vahekaugus 5dm)



**Joonis 1.1.** Aktsiaselts Kurmiku kiilvaiade tootevalik [3]

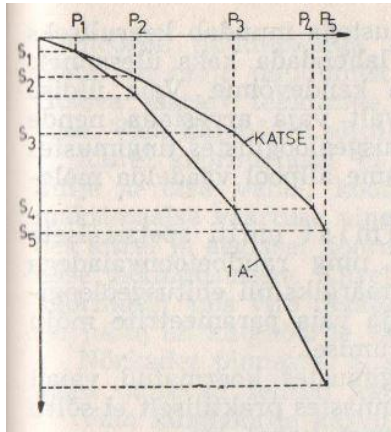
Kiilvaid on kasutatud savipinnastes, liivas ja anorgaanilistes täitepinnastes, kuigi majanduslikult suurim efekt on kiilvaiade kasutamisel moreenis ja suure veesisaldusega liivas. Kiilvail on eelised prisma-, püramiidi- ja rombikujuliste vaiade ees betooni kulu, pinnase tihendamise, rammimise ja transportimise aspektidest. Kiilvaivundamentide arvutamist, projekteerimist ja ehitamist reguleerib VEN 57-86, mille järgi on kiilvaia kandevõime määramise baasmeetodiks staatiline koormuskatse [16]. Kiilvaia kandevõimet hinnatakse arvutustega dünaamiliste koormuskatsete tulemuste alusel, staatiliste või dünaamiliste sondeerimiskatsete tulemuste järgi

ning pinnase füüsikaliste ja mehaaniliste omaduste järgi. Normatiivse piirkoormuse määramise metoodika staatiliste ja dünaamiliste koormuskatsete alusel on toodud normides GOST 5686-78 ja SNiP 2.02.02-85. Kiilvaia rammimisel täitepinnasesse tiheneb vaia ümbritsev pinnas kandevõimelt täitepinnase loodusliku kandevõimega samaväärseks, mistõttu on kiilvaia ümbruse hilisem lahtikaevamine töömahukas. Kiilvaia kandevõimet on kõige keerulisem määrata juhul, kui vaiale on üheaegselt rakendatud paindemoment, horisontaal- ja vertikaalkoormus. Selliste koormuskombinatsioonide vaiale lubatavat rakendamist saab kontrollida vaid staatilise proovikoormamisega. VEN 57-86-s soovitatud arvutusmeetodites on jäetud horisontaalsuunalistele paigutustele kahekordne varu, et mitte ülehinnata vaia ülemise otsa ümber asuva pinnase omadusi [16]. Pinnase omadused mängivad suuremat rolli moreenis, mis on suuresti sõltuvuses veeesisaldusest. Varutegureid on võimalik vähendada täiendavate katseandmete saamisel, et tagada kiilvaia horisontaalkandevõime täielik kasutamine. [1]

## **1.2. Kiilvaiade kandevõime hindamine**

Sõltuvus kiilvaiade ja ka alternatiivsete vaiade vajumi ja koormuse vahel on sarnase ülesehitusega. Vaia kandevõime sõltuvus vaia vajumi ja koormuse vahel  $S=f(P)$  on kujutatud joonisel 1.2. Koormuse ja vajumi sõltuvuse muutusest olenevalt saab jagada vaia koormamise iseloomulikesse punktidesse: koormus vaia külghõõrde töötamisel pinnase summaarse jääknidususe vastuvõtmiseks ( $P_1$ ); koormus vaia külghõõrde ületamiseks ja koormuse andmiseks vaia otsale ( $P_2$ ); koormus vaiaotsa aluse pinnase tihendamiseks piirini, mil hakatakse pinnast välja suruma – proportsionaalsuspiir ( $P_3$ ); piirkoormus ehk viimane koormusaste enne vaia aluse purunemist ( $P_4$ ), misjärel vaia aluse kandevõime raugub ( $P_5$ ) [5].

Vaia kandevõimet iseloomustab kõige paremini proportsionaalsuspiir, mis eraldab pinnase tihendamise ja väljasurumise vahelist koormust [5, 17]. Proportsionaalsuspiiril on täielikult realiseerunud vaia külghõõre ja vaiaots käitub lineaarselt deformeeruva keskkonna seaduspärasuste järgi – on võimalik kasutada elastsusteooriat. Proportsionaalsuspiir ei näita küll maksimaalselt vaiale lubatavat koormust, kuid seda ei tohiks ületada. [5]



**Joonis 1.2.** Koormuse ja vajumi sõltuvus. Ülemine kõver iseloomustab vajumi katselist sõltuvust, kus horisontaalsel skaalal kujutatakse koormuse kasvu ja vertikaalsel skaalal vajumi suurust. [5]

Vaivundamendi vajumit arvutatakse äärmuseni lihtsustatud skeemi järgi, mis on suhteliselt nõrgalt seotud vaia ja pinnase tegeliku koostööga. Oluliselt paremini iseloomustab kiilvaia koormamisel toimuvat proportsionaalsuspiir, mis on tinglik piir, mille ületamisel domineerivad pinnase tugevusomadused vaia vajumi põhjustajatena. Tinglikult on kiilvai vaheetapiks üleminekul vaialt madalvundamendile. Üksiku kiilvaia töös on omaseid jooni nii vaiale kui madalvundamendile. Kiilvaia kandevõime jagatakse tinglikult kaheks teineteisest sõltumatuks osaks: külje ja otsa kandevõime. Horisontaal- või vertikaalkoormuste korral on koormamistulemuste võrdlemiseks vaia tahkude liigitamine ainuvõimalik lähenemine. Kiilvaia vertikaalkoormamisel jaguneb pinnasele kantav koormus otsa, vertikaalkülje ja kaldkülje vahel. Normaalpinged külgpindadel vaiapea läheduses on nullilähedased. Pinged kasvavad sügavuti, kuid jäävad kiilu otsa juures väiksemaks vaia otsal tekkivast püstsüüalisest normaalpingest. Vaia erihõõre vertikaalpindadel kasvab tunduvalt aeglasemalt kui pinnase nihketugevus, mistõttu loetakse erihõõre konstantseks. Kiilvaia kaldküljel tekkiv normaalpinge mõjutab külghõõret samal viisil, kuid vertikaalkomponendi tõttu võtab vai vastu ka osa vertikaalkoormusest. Seetõttu on kiilvaia ja katseplaadi käitumises ühtseid jooni. Tihedas ja kesktihedas liivas kaasneb vaia süvistamisega intensiivne pinnase väljasurumine, mis tihedas liivas võib tekitada kobestunud tsooni. Kohevas liivas kaasneb vaia rammimisega pinnase tihenemine. [6]

Vaia käitumist pinnases rammimistulemuste põhjal püüdis esimesena kandevõime määramisel arvestada N. M. Gersevanov, kusjuures ise märkides, et dünaamiliste meetoditega saab üldjuhul

määrata ainult vaia proportsionaalsuspiiri koormust (elastsuspiir). Vaia staatilise proovikoormamise andmete võrdluses dünaamika valemitega keskenduti eelkõige Gersevanovi valemile, kui Eestis kõige enam levinule, (valem 1.1), kuid leiti suuremad kokkulangemised Gate'i valemiga arvatatud proportsionaalsuspiiriga (valem 1.2). Gersevanovi valem on kõige sobilikum kandevõime arvutusteks, kui vasted jäävad vahemikku 2–15 mm. Väiksemate vastete puhul valem ülehindab, suuremate vastete puhul alahindab tegelikku proportsionaalsuspiiri väärtust. Vaiade staatilisel proovikoormamisel külghõõret ja proportsionaalsuspiiri ületavate koormustega kaasnevad vajumid jäävad 1,5–2,5 mm ja 5–15 mm vahemikku. Alla 2 mm vastetel vaia külghõõret ei ületata, kulub rohkem energiat vaia süvistamiseks ja suurem energia kulu põhjustab kandevõime ülehindamist. Suurematel vastetel kui 15–20 mm pinnase struktuur puruneb, algab pinnase väljasurumine vaiaotsa alt, vaste suureneb ja kandevõimet alahinnatakse. [7]

Gersevanovi valem SNiP 2.02.03-85 järgi [8]:

$$F_u = \frac{\eta AM}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{4 E_d}{\eta A s_a} \frac{m_1 + \varepsilon^2 (m_2 + m_3)}{m_1 + m_2 + m_3}} - 1 \right], \quad (1.1.)$$

kus  $F_u$  on vaia piirkandevõime;

$\eta$  – vaia materjalist lähtuv tegur (kaitsepeaga r/b vaiad  $\eta=1500$  kN/m<sup>2</sup>, kaitsepeaga terasvai:  $\eta = 1000$  kN/m<sup>2</sup>) kN/m<sup>2</sup>;

$A$  – vaia ristlõike pind pinnase arvutuslikus tasapinnas m<sup>2</sup>;

$M$  – pinnase tüübist sõltuv koefitsient, vaia rammimisel vasaraga väärtuseks 1;

$E_d$  – löögienergia  $E_d = gmH$  kNm;

$s_a$  – vaste, vaiapea vajum ühest löögist m;

$m_1$  – vasara kaal t;

$m_2$  – vaia ja vaiapea kaal t;

$m_3$  – löögimehhanismi kaal t;

$\varepsilon$  – löögi parandustegur, raudbetoonvaiade puhul  $\varepsilon^2=0,2$ ;

$g$  – raskuskiirendus m/s<sup>2</sup>.

Kiilvaiade kandevõime määramiseks vastavad valemid puudusid. Arvutusteks kasutati Gersevanovi ja Gate-Killari valemeid, kuid need olid eelkõige mõeldud üldiselt vaiade kandevõime leidmiseks arvutuslikul teel [6].

Gersevanovi valemi kasutamisel rammimistulemustest kiilvaiade kandevõime leidmisel, võrdluses Turva polügoonil tehtud uuringutega, oli vastetel alla 15 mm arvutuslik kandevõime võrdeline proportsionaalsuspiiriga. Vastetel vahemikus 15–30 mm leitud proportsionaalsuspiir oli võrdeline piirkandevõimega ja suurematel vastetel kui 30 mm ületas valemiarvutuste tulemusena saadud proportsionaalsuspiir piirkandevõimet 1,5–2-kordselt [6].

Gate'i valem vaia proportsionaalsuspiiri määramiseks: [7]

$$P = keQH \log\left(\frac{25}{e}\right), \quad (1.2.)$$

kus  $P$  on vaia piirkandevõime;

$k$  – korrelatsioonitegur;

$e$  – vaste (vaia vajum ühest löögist) cm;

$Q$  – vasara mass mg;

$H$  – vasara kukkumiskõrgus cm.

Rammimisandmeil proportsionaalsuspiiri paremaks määramiseks sobiliku Gate'i valemiga arvutamisel saadakse korrelatsiooniteguri  $k$  muutmisel väärtused, mis langevad kokku vaia staatilisel proovikoormamisel määratud proportsionaalsuspiiriga nii raudbetoon- kui terastoruvaiaade puhul [7]. Gate'i valemit kohandas ja täiendas Eesti pinnastega sobivamaks E. Killar 1972. aastal, mille kasutamisel võis Turva polügoonil tehtud katsete põhjal samastada

arvutustulemused vaia arvutusliku kandevõimega [6]. Katseandmete analüüsis on välja toodud, et vaia rammimisel vastetega 2-20 mm on Gate-Killari valemi (valem 1.3) arvutuslik kandevõime võrdeline proportsionaalsuspiiriga. Vastetel üle 20 mm on arvutuslik kandevõime võrdeline 1,5-kordse proportsionaalsuspiiri väärtusega [6]. Kiilvaimudelitega 2015. aastal tehtud katsetustes ei kattunud Gate-Killari valemi järgi tehtud arvutused staatilisel koormamisel saadud kiilvaiade vertikaalse kandevõimega [11].

Gate-Killari valem vaia proportsionaalsuspiiri määramiseks [6]

$$N_G = K \sqrt{0,07GH} \log \frac{25}{s_a}, \quad (1.3.)$$

kus  $N_G$  on vaia piirkandevõime;

$K$  – korrelatsioonitegur  $K = 2$ , kui  $s_a > 0,5$  cm;  $K = 3$ , kui  $s_a < 0,5$  cm;

$G$  – löögiosa kaal kN;

$H$  – löögiosa efektiivne kukkumiskõrgus cm;

$s_a$  – vaia vaste cm.

Vaia kandevõime hindamiseks ei sobi dünaamika valemid, kui ehitusgeoloogilistes tingimustes esineb kõva konsistentsiga paleosoikumi savi, klindiesist moreeni või voolava konsistentsiga saviliiva [7]. Staatilistel proovikoormamistel määratud tulemustest märkimisväärselt väiksemad tulemused saadakse, rammides vaia kolloidseid orgaanilisi aineid sisaldavatesse liivadesse, kruusadesse või dünaamiliste mõjutuste suhtes tundlikesse pinnastesse. Suuremad väärtused esinevad vaia rammimisel survele veega tolmu- ja peenliiva pinnastesse [7]. Eesti NSV ehitusgeoloogiliste uurimiste ajutiste juhiste järgi tolmliidaks klassifitseeritud liiv on fraktsiooni järgi mölliline liiv või rohke liivaga möll [15].

Vaia arvutusliku kandevõime leidmine on teostatav ka surupenetreerimise teel, kuid seda tuleb teha vaia rammimisega lähedasel ajal. Pikema aja möödudes pole vaia arvutuslikku kandevõimet võimalik surupenetratsiooni teel määrata, kuna vaia ümbritseva tihenunud pinnasetsooni parameetrid määrab pinnase seisund rammimishetkel. [6]

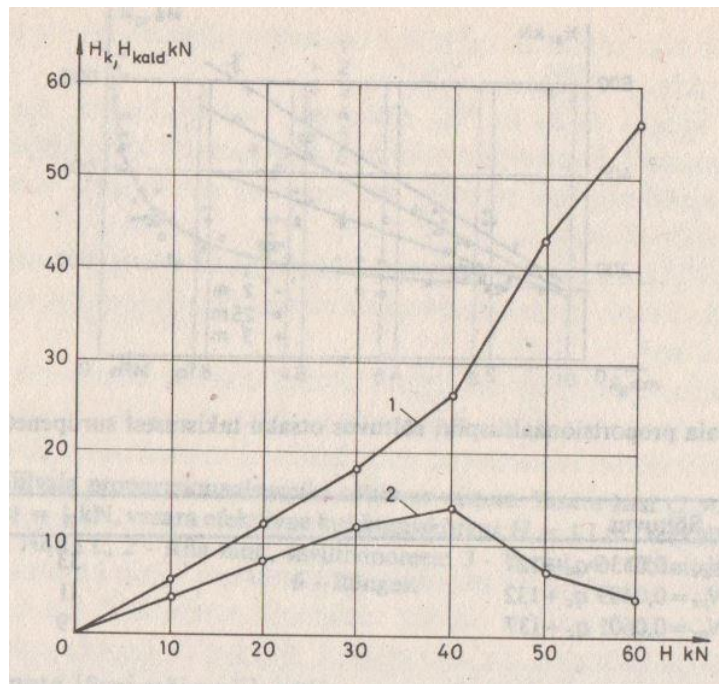
### 1.3. Kiilvaiade horisontaalkandevõime

Eelduste kohaselt töötab kiilvaia horisontaalsel koormamisel vaiale mõjuva koormuse vastuvõtmisel vaia ots, küljed ja kaldtahud. Vaia maasse rammimisega kaasneb pinnase tsooniti tihenemine ja kobestumine vaia ümbert. Kiilvaiade arvutusliku horisontaalkandevõime määramiseks teostasid „EKE Projekti“ Tartu osakond ja Riiklik Ehitusuuringute Instituut 1991. aastaks kiilvaiadega 59 horisontaalkoormuskatset. Katsete käigus koormati vaiu paariviisi, tõugates neid, põhiliselt kaldkülgede suunas, teineteisest eemale [12]. Kiilvaia horisontaalsel koormamisel ületatakse esimesena pinnase hõõrdetakistus mõjuva jõuga paralleelsetel pindadel ja surutakse samaaegselt kaldpindade ette jäävat pinnast kokku [6].

Vertikaalsete kaldpindade maksimaalse hõõrdetakistuse osakaalu leidmiseks vaiale mõjuva tegeliku jõu suhtes, võeti aluseks plaatkoormuskatsed. Ülesande lihtsustamiseks tehti eeldused, et kiilvai on jäik ja pöördub horisontaaljõu mõjul ümber keskpunkti, pinnase deformatsioone põhjustavad jõud kaldpindadel võrdsustati plaatkoormuskatsetel analoogseid deformatsioone põhjustava jõuga. Sellisel viisil saadi püramiidvaiade horisontaalkandevõime arvutamisel tingimusi rahuldav kooskõla arvutuste ja katsetulemuste vahel. Katsetel mõõdetud paigutiste järgi arvutati välja vaia kaldpindade poolt pinnasele üleantav horisontaaljõud, mille lahutamisel vaiale mõjuvast kogujõust saadi hõõrde ületamiseks kulutatav jõud (joonis 1.3). Graafikul on näha, et külghõõrde osakaal on lineaarselt kasvav kuni 40 kN horisontaaljõuni, moodustades sellest ca 35 %. Võib eeldada, et ületades 40 kN suuruse horisontaaljõu, algab pinnase väljasurumine, mistõttu külghõõrde osatähtsus hakkab vähenema. Arvutusliku horisontaalkandevõime leidmiseks tehtud eeldused ei arvestanud esmaste nihkealade tekkimist ja arengut ega pinnase väljasurumise algust, mistõttu tekkisid vastuolud külghõõrde ammendumise osas. Tinglikult võib kiilvaia horisontaalkandevõime määramisel lähtuda proportsionaalsuspiirist, mille ületamisel algab tõenäoliselt pinnase väljasurumine. [6, 12]

Kiilvaia arvutusliku horisontaalkandevõime määramisel lähtuti SNiP 2.02.03-85 nõuetest. Piirkandevõime määramisel eeldati, et vaiapea horisontaalpaigutise piiriks on 10 mm, kuid omavaheline selgepiiriline sõltuvus proportsionaalsuspiiri ja horisontaalpaigutise vahel puudub. Kiilvaia horisontaalne arvutuslik kandevõime on võrdeline proportsionaalsuspiiriga. [6]





**Joonis 1.3.** Vaia külghõõrde sõltuvus vaiale rakendatud koormusest: 1 – kaldkülgedega vastuvõetav koormus, 2 – külghõõre

Vaia horisontaalkandevõime sõltub põhiliselt ülemisest 1–1,5 meetri paksusest pinnasekihist [9]. Vaiade koormamisel kahe vaiapea teineteisest eemale surumisel vaia alumine ots kaasa ei tööta. Kõige aktiivsemas sesoonse muutlikkuse tsoonis võivad pinnase geoloogilised omadused suures piiris muutuda [9]. Vaia horisontalkandevõime uurimisel võib eristada samu iseloomulikke koormusi kui vertikaalkandevõime uurimisel [9]. Suuremat tähelepanu vaia horisontaalkandevõime uurimisel väärivad vaia summaarne külghõõre, proportsionaalsuspiir ja vaia purunemine [9]. Proportsionaalsuspiiri koormus sõltub vaiale rakendatud jõu suunast ja on kaldkülgpindade ristasandil rakendatud horisontaaljõu puhul suurem kui temaga risti rakendatud horisontaaljõu korral [9]. Katse käigus purunenud vaiade lahtikaevamisega määrati nullpunkti sügavus maapinnast, mille järgi määrati külghõõrde osakaal vastuvõetavast koormusest [9]. Vaiade horisontaalsel koormamisel tuleb arvestada vaia koormamise viisiga. Suurem osa vaiade vertikaalkandevõimete katsetustest on läbi viidud viisil, mil vaiade pööre ei ole takistatud [18]. Kiilvaiade kasutamises puuduvad praktilised lahendused olukordade puhul, kus kiilvaiale mõjuv vertikaalsuunaline koormus on väiksem kui horisontaalsuunaline. Sellised olukorrad esinevad

näiteks müratõkkeseinte puhul, kus laia külgpinnaga seinad peavad vastu võtma suurte külgtuulte poolt põhjustatud koormusi. Sarnane jõudude vahekord esineb ka kerge konstruktsiooniga viilhallide korral, kus hoone omakaal ei ole suur võrreldes külgedele mõjuva koormusega.

#### **1.4. Pinnase käitumine vaiade rammimisel**

Pinnase tugevus ja mehaanilised omadustest määravad vaia kandevõime. Klassikaliste vaiade süvistamise eesmärk on jõuda paremat kandevõimet omavatesse alumistesse pinnasekihtidesse. Kiilvaia kaldtahkude eesmärk on süvistamisel tihendada ümbritsevat pinnast viisil, mis annab pinnasele piisava kandevõime koos vaiaga ehtiselt tulevat koormust vastu võtta.

Pinnase omadusi jagatakse tunnus- ja mehaanilisteks omadusteks [15]. Pinnaseomadused määratakse laboris teimidega. Tunnusomadusteks on pinnase mahumass, veesisaldus, poorsus, küllastusaste, tihendusaste, plastsuspiir, voolavuspiir, plastsusarv ja voolavusarv [15]. Pinnase mehaanilised omadused jagunevad veega seotud omadusteks, jäikuseks ja tugevusomadusteks [15]. Nursi polügoonil tehti katseid kahekihilistes pinnastes, kus 0,9–1,1 m paksuse peenliivakihi all oli moreen, pinnase keskmine mahumass 20,8 kN/m<sup>3</sup> [12].

Vaia rammimine pinnasesse tihendab ümbritsevat pinnast ja surub osa pinnasest välja [10, 17]. Savisse ja liiva rammitud vai surub pinnast välja 85–100 % vaia mahust, protsent on suurem halvema kandevõimega pinnase puhul [10]. Tihendamise osa ei ületa kolmandikku väljasurutud pinnasest [17]. Väljasurumisprismade ulatus on 2–4 vaia laiust ja suurimad vertikaalpaigutused vaiast 15–40 cm kaugusel [10, 11]. Pikemate vaiade pinnasesse rammimisel on pinnase tihenemine suhteliselt suurem, sest sügavamalt on raske pinnast välja suruda [17]. Horisontaalsel koormamisel töötab koormuse vastuvõtmisel pinnas vaia ümbruses, mis tähendab, et enne vaia materjali purunemist ületatakse hõõrdejõud vaia külgede ja pinnase vahel [18]. Horisontaalsuunalisel koormamisel võtab koormuse vastu pinnas ühe kaldtahu ees, vaia külgedel ja otsas, eeldades umbes kahekordselt vähendatud kandevõimet. Kuni ühe vaialaiuse kauguseni vähenevad vertikaalpaigutised peaaegu sirgjooneliselt ja sealt edasi lõikub sirge loodusliku maapinnaga [10]. Maapinna lähedased kihid, mis on rammimise käigus saanud suurema paigutuse, tihenevad vähem kui sügavamad kihid [10, 11]. Tihenemise juures mängib suurt rolli

pinnase niiskus, maksimaalse tugevuse saavutab pinnas kui looduslik niiskus vastab optimaalsele niiskusele [10]. Vaia pinnasesse rammimise ajal esinevad ilmastikutingimused mõjutavad vaia kandevõimet. Rammimisajast sõltub vaia kandevõime ja seda mõjutavad sesoonse muutlikkuse tegurid [10]. Seetõttu tuleks vaiatööd teostada ajal, mil pinnas on optimaalse niiskusega.

## **2. MATERJAL JA METOODIKA**

### **2.1. Kiilvaimudelite kirjeldus**

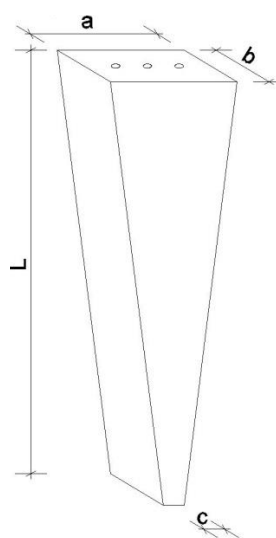
Esialgsete katsete plaanis oli kavas kasutada kolme raudbetoonist kiilvaimudelit, mis baseeruvad aktsiaselts Kurmiku poolt kasutuses oleva kiilvaia 20.3F viiekordselt vähendatud mudelil. Kiilvaimudelile on võrdluseks toodud laiuse variatsioonid, et leida, kas kiilvaia paksuse muutmine annab horisontaalsuunalisele kandevõimele lineaarse kasvu või mitte. Kiilvaimudelid tähistatakse paksuste järgi. Tähis KV30 iseloomustab 392 mm pikkust raudbetoon kiilvaia laiusega 30 mm; tähis KV60 iseloomustab 397 mm pikkust raudbetoon kiilvaia laiusega 60 mm ja tähis KV90 iseloomustab 403 mm pikkust raudbetoon kiilvaia paksusega 91 mm (joonis 2.1). Pärast esimeste mudelkatsetuste sooritamist selgus, et kolme keermestatud pesaga betoonist vaiapea ei kannata mitmekordset pinnasesse rammimist. Keevitatud terasdetailid vaia süvistamisest nõrgestatud vaiapeas ei võtnud horisontaalsuunalisel koormamisel tõmbetsoonis koormust vastu. Iga vaiamudeliga sai teha vaid kaks katset: vaiapead mõranesid ja keermepesad tulid koormamise käigus vaiadest välja. Kui esimese katsega purunes kiilvaia üks tõmbele töötanud servapoolne keermepesa, sai vaia 180 kraadi pöörates teha katsetus teiselt küljelt koormates. Varem tõmbetsoonis purunenud keermepesa võttis teisel katsel vastu survetsoonis tekkinud jõud ja täitis oma eesmärgi. Probleemi esmasel ilmnemisel otsustati kasutusele võtta terasest vaiad. Olenemata raudbetoonist kiilvaimudelite purunemisest saab nende koormamisel mõõdetud katseandmeid analüüsis kasutada.

Kiilvaimudeli materjali muutmisel muutub külghõõrde suurus, kuid vaiade tööpõhimõtte horisontaalsel koormamisel jääb samaks – kandevõime moodustab pinnase vastupanu ja horisontaalsete pindade külghõõre. Terasvaiadele üleminekul lisati ka neljas vaiamudel, milles jäädgi viiekordselt vähendatud 20.3F vaia paksuse juurde, kuid suurendati vaia kõrgust 25 % ja vaiapea pikkust kaldtahkude suunas 22 %. Suurendamise eesmärgiks oli võrrelda kiilvaiade süvistamissügavuse muutmisel toimuvat kandevõime muutumist, jättes koormamisega risti oleva kaldpinna paksuse muutmata.



**Joonis 2.1** Raudbetoonist kiilvaimudelid

Terasest kiilvaimudelid tähistati järgmiselt: T-30 – 30 mm paksune kiilvai pikkusega 400 mm; T-60 – 60 mm paksune kiilvai pikkusega 400 mm; T-90 – 30 mm paksune kiilvai pikkusega 400 mm; T-60-500 – 60 mm paksune kiilvai pikkusega 500 mm. Katsetel kasutatud kiilvaimudelite mõõtmed on esitatud joonisel 2.2.



Kiilvaimudel tähis	Mõõtmed, mm				Mass, g	Ruumala, cm <sup>3</sup>
	a	b	c	L	m	V
KV30	121	30	20	392	1925	829
KV60	120	60	16	397	4007	1620
KV90	121	90	17	403	6117	2503
T-30	120	30	15	400	3448	810
T-60	119	60	16	400	6086	1620
T-90	119	90	17	400	8344	2448
T-60-500	146	60	16	500	8447	2430

**Joonis 2.2** Katsetes kasutatud kiilvaimudelite mõõtmed

Raudbetoonvaiad on armeeritud 8.8 tugevusklassiga M8 keermelattidega, mis on omavahel otsadest kinni keevitatud ja seotud 1 mm läbimõõduga sidumistraadiga. Iga keermestatud lati vaiapea poolsesse otsa on keevitatud tugevusklassiga 8.8 jätkumutter, mille abil kinnitatakse vai katseseadeldise külge. KV30 mudeli kinnitamiseks katseseadme külge on kaks jätkumutrit, üks kummalgi pool vaiapead, KV60 mudelil neli ja KV90 mudelil kuus. Keermelatid lisati betooni vaiale mõjuva surve vastuvõtmiseks – horisontaalsel koormamisel tekib vaia horisontaaltasapinnas surve- ja tõmbetsoon. Betoon töötab survele paremini kui tõmbele, selle kompenseerimiseks tuli lisada armatuurid vaia külgedele. Vaia keskel on jätkumutter, mida kasutatakse vaia rammimisel juhtvarda kinnitamiseks. Esimeste katsekehade valamisel jäeti keskmine jätkumutter armatuuriga sidumata, mistõttu tekkisid komplikatsioonid vaiade maasse rammimisel. Katsekehade valamisel on kasutatud C45/50 Uninax graniitbetooni. Vormiks on kasutatud veekindlat vineeri (joonis 2.3).



**Joonis 2.3** Raudbetoonist kiilvaimudelite armeering ja vormid

Raudbetoonist vaiadega ei olnud võimalik teostada üle ühe horisontaalkoormuskatse kaldpinna kohta, armeeringu keevised tõmbetsoonis purunesid. Aktsiaselts Kurmiku poolt tuli idee kasutada katsetusteks terasest vaiu. Sellisel juhul on ühekordne väljaminek suurem, aga terasvaiade kasutamine võimaldaks samade katsekehadega teostada ka järgmiseid kiilvaimudelite katsetusi. Katsetel kasutatud terasest vaiad on kujutatud joonisel 2.4.



**Joonis 2.4** Terasest kiilvaimudelid, vasakult paremale: T-60-500, T-60, T-90, T-30

Terasvaiade külgtahud keevitati kokku 6 mm paksusest terasplaadist, vaia pealmine keermestatud pesadega plaat 20 mm paksusest terasplaadist. Vaiamaterjali muutmisel otsustati lisada ka neljas katsemudel, 500 mm pikkune terasvai tähisega T-60-500.

## 2.2. Katsetel kasutatud pinnase kirjeldus

Katsete sooritamisel pinnasetihedust ei uuritud. Pinnase omaduste andmed on võetud Erko Varese 2015. aastal kaitstud magistritööst, milles on testitud pinnaseproove samast Eesti Maaülikooli labori pinnasekastist, kus toimus ka kiilvaimodelite horisontaalkandevõime uurimine katsetamise teel. Enne igat katset kaevati pinnasekast vaiapikkuse jagu (400–500 mm) läbi ja tihendati trampimise teel umbes 15 cm kihtidena. Sellisel viisil tihendatud pinnase tiheduseks on hinnanguliselt  $\rho = 1,43 \dots 1,50 \text{ g/cm}^3$  [11].

Katsetel on kasutatud Aardlapalu karjäärist kaevandatud peenliiva, mis on pestud ja sõelutud. Liiv kaevandati hüdrokaevandamise teel, tehnoloogiliste protsesside tõttu on peened savi- ja huumuseosakesed välja uhutud. [11]

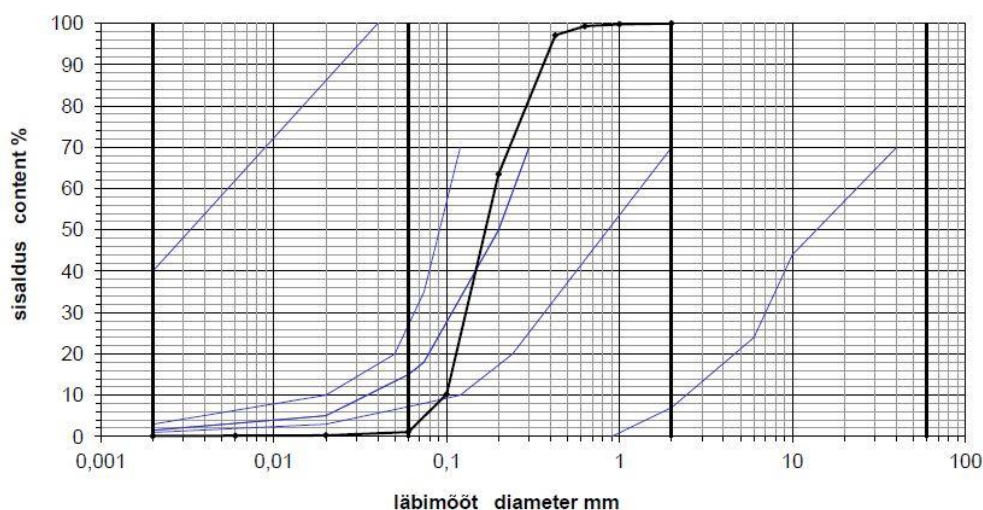
*Pinnase parameetrite uuringud toimusid Eesti Keskkonnauuringute Keskuses Tallinnas, kuhu viidi labori pinnasekastist kolmekilone rikitud struktuuriga proov. Uuringute käigus määrati liiva lõimis, veesisaldus, tihedusaste ja nihketugevus. Võetud proovid liigitusid ka Standardi EVS 1997-1:2003 alusel peenliivaks. Lõimise jaotumine fraktsiooni läbimõõdu järgi on toodud välja*



tabelis 2.1 ja lõimiskõver joonisel 2.5. Nagu tulemustest selgub, oli katsetel kasutatud liiv väga ühtlane. Peamiselt oli tegemist vaid kahe – peenliiva ja keskliiva fraktsiooniga, mis moodustasid 98,2 % kogu sisaldusest. [11]

**Tabel 2.1** Katsetel kasutatud pinnase lõimise jaotumine fraktsiooni läbimõõdu järgi [11]

	Fraktsiooni läbimõõt mm, sisaldus %																	
Pinnas	Veeris	Kruus				Liiv				Möll				Sau				C <sub>u</sub>
		Jäme	Kesk	Peen		Jäme	Kesk	Peen		Jäme	Kesk	Peen						
EVS 1997- 1:2003	>60	60...20	20...6	6...2	kokku	2...0,6	0,6...0,2	0,2...0,06	Kokku	0,06...0,02	0,02...0,006	0,006...0,002	Kokku	<0,002	<0,06	<0,002/0,06	d <sub>50</sub> /d <sub>10</sub>	
Peenliiv	0	0	0	0	0	0,7	35,8	62,4	98,9	0,8	0,1	0,1	1	0	1,1	9,1	1,9	



**Joonis 2.5** Katsetel kasutatud pinnase lõimiskõver [11]

Liivpinnase tihedusomadusi uuriti nii Proctorteimi kui ka Terzaghi teimi abil. Standard-Proctorteim näitas keskmiseks maksimaalseks tiheduseks  $\rho_{dmax} = 1,59 \text{ g/cm}^3$  ja Terzaghi puhul  $\rho_{dmax} = 1,64 \text{ g/cm}^3$  ning  $\rho_{dmin} = 1,39 \text{ g/cm}^3$ . Poorsustegur tihedaimas olekus  $e_{min} = 0,62$  ja kohevaimas olekus  $e_{max} = 0,92$ . Nihketeimi katsete põhjal saadi pinnase sisehõõrdenurgaks  $\phi = 31$  kraadi ja nidususeks  $c = 3 \text{ kPa}$ . [11]

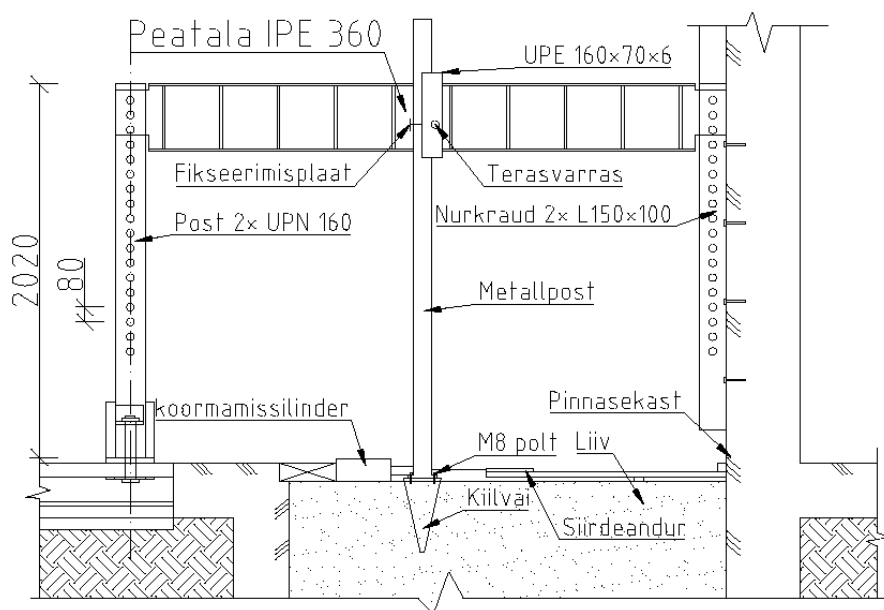


Pinnase nidususe  $C = 0$  kPa korral on sisehõõrdenurk  $\phi = 32^\circ$  [14]. Arvutustes kasutatakse pinnase sisehõõrdenurka  $C = 0$  kPa nidususe korral.

## 2.3. Katseseadmestik

### 2.3.1. Katseraamistik ja pinnas

Katsed toimusid Eesti Maaülikooli laboris, Kreutzwaldi 56, konstruktsioonide labori  $3500 \times 2000$  mm küljemõõtudega pinnasekastis. Pinnasekastis olevat liiva on kirjeldatud punktis 2.2, katseseadmestikku on kujutatud joonisel 2.6. Laboripäevik on töö lisas A.



**Joonis 2.6** Pinnasekasti ja katseseadmestiku lõige

Katseseade ehitati pinnasekasti kohale. Jäikusribidega IPE 360 peatala kinnitati pinnasekastist kahe meetri kõrgusele. Tala fikseeriti üheltpoolt kahe UPN 160 posti ja teiselt poolt raudbetoon seinale M16 keermelattidega kinnitatud nurkraudade  $L 150 \times 100$  mm vahele. Peatala külge monteeriti UPE  $160 \times 70 \times 6$  mm tala, mille ülesandeks oli hoida kiilvaia fikseerimiseks ja vaia pinnases pöördumise tõkestamiseks kasutatav metallposti. UPE detailile oli sisse freesitud ava terasvardale, mille ümber sai metallpost takistamatult vaia siirdest põhjustatud pöördnurga

ulatuses liikuda. Tala poolt vaiale rakendatav vertikaalne koormus viidi minimaalseks, kinnitades rammimise järgselt post fikseerimisplaadi abil terasvarda külge. Posti külge kinnitati pinnasesse rammitud vai vastavalt vaia suurusele: 30 mm paksuste vaiade kinnitamiseks kasutati kahte 8.8 tugevusklassiga M8 polti, 60 mm paksuste puhul nelja ja 90 mm paksuste puhul kuute. Pinnasekasti raudbetoonist servale ehitati terasest raskustega pikendus, et jõuda koormamissilindri otsaga postile keevitatud koormamispunkti. Koormamispunkti vastasküljele paigutati siirdeandur, mis kinnitati pinnasekasti kohale puitlaua külge. Laua fikseerimiseks kasutati vaiast 1,3 meetri kaugusele pinnasele toetatud  $50 \times 50$  mm puitprussi ja seina äärde paigutatud vastukaalu. Katseseadmete elementide mõõdud olid dimensioneeritud vastavalt M. Linde ja R. Needo poolt läbiviidud proovikoormamisele, kus katsetati talakingaga puitprusside külge kinnitatud ühe keermega 30 mm paksuse kiilvaia horisontaalset koormamist [13].

### 2.3.2. Katseseadmed

Katseandmeid salvestati ALMEMO® 5690-2 AHLBORN süsteemiga (joonis 2.7). Süsteemi 99-st pesast leidis rakendust vaid kaks. Katsete jooksul salvestus ühesekundilise intervalliga survesilindris olev rõhk baarides kümnendiku täpsusega ja siirdeanduri näit kiilvaia horisontaalsuunalise liikumise kohta millimeetrites sajandiku täpsusega. Katseandmete salvestamiseks oli kasutusel SD-kaart.



**Joonis 2.7** ALMEMO 5690-2 AHLBORN andmesalvestuse süsteem [11]

Kiilvaimudelitele horisontaalse koormuse andmiseks kasutati survekatseseadet Lukas LZM 25/200. Hüdraulilisel õlisurvel töötava seadme maksimaalne jõud on 250 kN ja silindri käik 200 mm (joonis 2.8). Lukas LZM 25/200 seadme tareerimistabelil on antud suhtarv survecilindri ühe kN näidustamiseks suurus 2,026 baari. Survet cilindris tõsteti Lukase hüdraulilise käsipumbaga (joonis 2.9). Lukase cilindri ja Almemo andmesalvestussüsteemi mõõtmistäpsuseks on 0,1 bar. Cilindri otsa paigutati kumera servaga detail koormuse paremaks ülekandmiseks postile.



**Joonis 2.8** Lukas LZM 25/200 survecilinder proovikoormamisel



**Joonis 2.9** Lukase cilindri hüdrauliline käsipump

Vaiade vertikaasuunalise liikumise mõõtmiseks kasutati 0,01 mm mõõtmistäpsusega ALMEMO FWA100T AHLBORN siirdeandurit. Siirdeandur kinnitati pinnase kohale, jättes anduri kinnituslaua ja pinnase vahele piisavalt ruumi, et katse käigus tõusev pinnas siirdeandurit mõjutama ei hakkaks (joonis 2.10).



**Joonis 2.10** Siirdeanduri paiknemine pinnase suhtes

Siirdeanduri fikseerimiseks kasutatud latt kinnitati tagumise servaga vastu pinnasekasti raudbetoonraami. Lati ja pinnase vahele jäeti piisav distant, et eeldatav piirkoormuse ületamise eelne pinnasetõus ei saaks takistatud. Anduri liikuv osa viidi enne katse algust vastu terasposti koormamissilindriga samale kõrgusele, vaiapeast kõrgemale. Posti ja vaia omavaheline kinnitus oli piisavalt püsiv, et post ja vai siirdusid võrdväärse pikkuse.

Vaia vertikaalkandevõime hindamiseks ja vaia pinnasse rammimiseks kasutati löökoormusseadet. Süvistamisel vaiapeale löögi andmiseks kasutati terasest vasarat, mille kaalu sai muuta olenevalt süvistatava kiilvaia massist: vasara mõõdetud kaaluks oli 7572 g, võimalusega lisada 2462 g ketas haamrile massi lisamiseks. Vasara vertikaalse langemise tagamiseks kasutati juhtvarrast kaaluga 882 g. Juhtvarda kinnitamiseks kasutati iga vaiamudeli keskmist M8 keermepesa. Vältimaks raudbetoonist kiilvaiade vaiapeade purunemist vasara löögist, kasutati löögi pehmendamiseks vineerplaati kaaluga 110 g. Vineerplaadi keskele puuriti auk juhtvarda jaoks. Vaia pinnasesse rammimiseks vajalikud seadmed on kujutatud joonisel 2.11.



**Joonis 2.11** Terasvaia T-90 rammimine pinnasesse 7572 g vasaraga

Abivahenditena jõuõlgade, vajumite ja koormamispunktide kauguse määramiseks kasutati NOVIPro viiemeetrist mõõdulinti, 200 mm pikkust loodi PROF ja roostevabast terasest joonlauda. Katsetulemused salvestati ALMEMO 5690-2 AHLBORN seadme abil SD-kaardile ja protokolliti katse käigus arvutisse.

## **2.4. Katsetetoodika ja katseplaan**

### **2.4.1. Katsetetoodika**

Katsete eesmärgiks on koormata kiilvaia horisontaalsuunas, tõkestades vaia pöördumine, kerkimine ja süvistumine, et määrata vaia külgtahu horisontaalsuunalise kandevõime. Katsetel deaalseid tingimusi luua ei suudetud. Kuna katsetalastiku ülemine ots oli fikseeritud, põhjustas see vaia horisontaalsuunalisel liikumisel ka vaia tõusu. Vaia tõusu magistritöös ei arvestata, kuna 1,6 m raadiuse korral on iga horisontaalsuunalise siirde ühiku kohta vertikaalne tõus 2,5 %. Katsetulemuste töötlemisel tuleb leida see osa rakendatud koormusest, mis võetakse vastu pinnase poolt. Katseseade on ehitatud põhimõttel, et koormamispunktist kõrgemale jääb suurema jõuõlga tugi, mis võtab vastu osa koormamissilindri poolt katseseadmele rakendatud jõust. Ülejäänud koormuse võtab vastu pinnas. Jõudude suuruse hindamisel lähtuti tugevusõpetuses ja

mehaanikas kasutatavatest printsiipidest. Katsetel mõõdeti koormamispunkti kõrgus pinnasest ja vaia peast. Koormamisel saadakse silindris oleva surve ümberarvestamisel horisontaaljõud ja katse teostamise ajal mõõdeti ülemise toepunkti kaugus koormamispunktist. Kiilvaiale pinnase poolt mõjuvate jõudude rakenduskohaks määrati punktkoormus kaks kolmandikku vaia pikkusest vaiapeast pinnase suunas. Kiilvaia kaldtahkudel horisontaalsuunalisel koormamisel mõjuvaid pingeid varem uuritud ei ole, seetõttu võeti aluseks koormamissuunaga paralleelselt oleva pinnase koormusepüüri kuju raskuskeskmega katsemudeli alumisel kolmandikul. Eesmärgi täitmisel lähtuti kirjanduse analüüsis kogutud andmetest varasemate kiilvaiadega tehtud katsetuste ja horisontaalsuunalise kandevõime määramise kohta. Otsiti seoseid vaiade piirkandevõimete ja proportsionaalsuspiiri vahel ning analüüsiti tuntumaid valemeid vaiade kandevõime leidmiseks. Vaia vertikaalse kandevõime hindamine dünaamiliste katsete teel sai tehtud Gersevanovi valemi abil, mis andis kõige värskema uurimuse põhjal kiilvaimudelite kandevõime leidmiseks täpseima tulemuse. Katsete alguses mõõdeti üle katsekehad, kandes protokollis vaia pikkuse, vaia paksuse, vaiapea paksuse, kiilu otsa laiuse ja vaia massi. Vaia rammimise eel kaevati liivakast ligikaudu poole meetri sügavuseni läbi. Vajadusel niisutati pinnast ja tagasitäidet tehes tihendati pinnast umbes 15 cm kihtide kaupa trampimise teel. Läbikaevamise järel siluti pinnas ja asuti kiilvaia pinnasesse rammima. Vaia süvistamiseks kasutati vasarat, mille langemine kiilvaia vertikaalsuunalise asetuse tagamiseks toimus mööda juhtvarrast. Vai süvistati pinnasesse, jättes vaiapea pinnasest ligikaudu 10 mm kõrgemale. Peale süvistamist juhtvarras eemaldati ja asuti katseseadet üles seadma. Katsetalastiku, survesilindri ja siirdeanduri paigaldamise järel mõõdeti vaiapea kaugused koormamispunktist, siirdeandurist ja katseseadme ülemisest kinnitusest. Koormuskatsetel tõsteti kiilvaiale mõjuvat vertikaalkoormust 1 kN kaupa, hoides iga koormusastet vaial kümme minutit ja märkides siirdeäite ühe, kolme, viie ja kümne minuti möödudes. Koormamine lõpetati, kui horisontaalne siire ületas 40 mm piiri, mis on kirjanduse analüüsi põhjal piisav suurus, et oleks ületatud proportsionaalsuspiir ja ammendunud pinnase kandevõime. Teras- ja raudbetoonvaiade katsetustel lisatakse graafikutele ja analüüsi protokollitud kandevõime muutuste kõrval ka muutused, mis tekkisid pinnases piirkandevõime ületamise järel. Viimaste koormamiste juures toimunud siirdeid on katsete ajal raske üles täheldada, kuid neid on võimalik hiljem andmete töötlemise käigus andmesalvestusseadmele salvestatud mõõdistustulemuste alusel tagantjärei protokollile lisada.

### 2.4.2. Katseplaan

Katsete tegemise eel töötati välja katseplaan. Katseplaani koostamise eeltöoks oli õppeaine „Ehituseriala diplomipraktika“ kursuse raames koostatud aruanne, mis hõlmas endas kiilvaiadega seotud kirjanduse uurimist ja raudbetoonist kiilvaiaga proovikatsede läbiviimist. Proovikatsede tulemusena dimensioneeriti pinnase külgsurve vastuvõtmiseks sobilikud seadmed, et tagada katsete eesmärgipärane läbiviimine. Katseplaan oli järgmine:

1. Katsekeha mõõdeti üle ja kaaluti. Kaaluti ka rammi juhtvarras, vasar ja vineerplaat ning tulemused kanti protokollile.
2. Pinnasekastis oleva liiva valmistati katseks ette: pinnasekast kaevati läbi vaia süvistamissügavuse ulatuses niisutati liiva ja tihendati trampimise teel umbes 150-millimeetrise kihtide kaupa kuni pinnasekasti ülemise servani. Pinnase siluti kahemeetrise laua abil ja madalamaks jäänud kohad täideti väljaspoolt katsepiirkonda võetud pinnasega.
3. Kiilvaia süvistamiskoha tšenter markeeriti pinnasele.
4. Kiilvai suruti ühe kolmandiku ulatuses pinnasesse.
5. Juhtvarras monteeriti vaiapea külge. Vineerplaat ja vasar asetati juhvarda ümber vaiapea tasapinda. Juhtvardale tehti märk 600 mm vasara käepideme ülemisest servast kõrgemale.
6. Rammimisvasar tõsteti kõrgusmäärgini ja lasti kukkuda. Tegevust korrati, kuni vaiapea ja pinnasekasti kõrguste vahe jäi umbes 40 mm.
7. Võeti kasutusele kahemeetrine latt, mis toetati risti üle pinnasekasti ja märgiti sellele kõrgus vaiapeast, pärast kõrguse määrimist eemaldati latt rammimise piirkonnast.
8. Sooritati rammimisvasaraga kolm lööki.
9. Latt asetati uuesti vaia kõrvale ja tehti uus määrimine.
10. Punkte 8 ja 9 korrati kuni vaiapea ja pinnasekasti kõrguste vahe oli 10 mm.
11. Vaia rammimisest saadud viimase kolme löögi vaste kanti katseprotokollile ja selle alusel arvutati vaia kandevõime dünaamilisel koormuskatsel.
12. Rammimisvasar ja löögileevenduse vineerplaat eemaldati juhvarda ümbert ja juhtvarras keerati vaiapeast välja.
13. Vaia peale toetati teraspost ja kinnitati õrnalt fikseerimisplaadiga UPE talasse freesitud terasvarda külge vältimaks posti ümberkukkumist.

14. Teraspost sätiti vaiapeaga kohakuti ja fikseeriti poltidega kindlalt vaiapea külge.
15. Fikseerimisplaadi abil kinnitati teraspost peatala külge, et posti omakaal ei langeks vaiale.
16. Pinnasekasti serva süvistati pesa koormamissilindri fiksaatorile ja asetati koormamissilinder otsaga vastu terasposti koormamispunkti. Silindri ja pinnasekasti vahe täideti 15 mm paksuste terasest plaatidega kuni vahe jäi minimaalseks. Koormamissilinder koos plaatidega suruti vastu pinnasekasti serva, jättes alla 10 mm vahe posti ja koormamissilindri otsa vahele.
17. Koormamissilindri vastasküljele asetati roovlatt, millele kinnitati siirdeandur. Latt suruti vastu pinnasekasti äärt ja siirdeandurit pikendati teraspostini.
18. Mõõdeti vaiapea kaugused koormamispunktist, siirdeandurist, pinnase tasapinnast ja ülemisest terasvardast ning kanti katseprotokoll.
19. Siirdeandur ja koormamissilinder ühendati Almemo andmesalvestuse süsteemiga, nulliti siirdeanduri näit.
20. Käivitati taimer ja alustati vaiale horisontaalkoormuse andmisega. Esimeseks koormusastmeks igal vaiatüübil oli üks kilonjuuton ehk kaks baari. Koormust hoiti peal kümme minutit või pinnase tihenemiseni koormusastme koormamise juures, kui ei olnud suuremat kui 0,05 mm suurust muutust kahe minuti jooksul. Siirdeandurid märgiti protokolliga iga koormuse esimesel, kolmandal, viiendal ja kümnendal minutil.
21. Tõsteti koormusastet vaiatüübi eeldatava kandevõime järgi, et tekiks kümme koormamisastet. Koormust hoiti kümme minutit.
22. Kandevõime rambumise korral koormati vaia kuniks andmesalvestusseade näitas vähemalt 40 mm pikkust siiret. Viimane näit kanti katseprotokoll.
23. Katsetoodikas määratletud 40 mm ületamisel vabastati koormamissilindri ventiil ja silindril lasti tagasi tõmbuda. Siirdeandur taandus koos postiga, lõppnäidu ja suurima siirdeväärtuse vahe andis pinnase elastse deformatsiooni väärtuse, mis kanti katseprotokoll.
24. Siirdeandur ja koormamissilinder eemaldati katsealalt.
25. Jäädvustati horisontaalsest koormamisest tingitud pinnasetõusud.
26. Kiilvai koos teraspostiga vabastati talastiku küljest ja tõsteti vertikaalsuunaliselt pinnasest välja, jättes kiilvaia poolt tekitatud auk puutumata.



27. Loodi ja joonlaua abil mõõdeti distant, mille kiilvaia ots oli katse jooksul läbinud ja kanti see katseprotokolli.

28. Kiilvai demonteeriti terasposti küljest ja katse lõpetati.

Katse lõppedes jälgiti ka pinnasesse tekkinud lõhesid. Lõhede kajastamiseks mõõtmistulemusi ei kogutud. Pinnases toimuvate muutuste visuaalseks analüüsiks jäädvustati tekkinud pinnasedeformatsioonid piltidele.

### 3. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS

#### 3.1. Kiilvaimudelite horisontaalsuunaline kandevõime

##### 3.1.1. Raudbetoonist kiilvaimudelid

Staatiliste katsete tulemusena saadi kaks põhilist näitajat – surve koormamissilindris ja sellele vastav kiilvaia horisontaalsuunaline siire pinnases. Katseandmeid ei saa töötlemata kujul lugeda kiilvaimudeli horisontaalseks kandevõimeks. Kandevõime leidmiseks tuleb määrata pinnase poolt vastuvõetava jõu suurus, mis on võrdeline suurema osaga koormamissilindri poolt rakendatud koormusest. Jõu suuruse hindamiseks on kasutatud valemit 3.1.

$$N_y = \frac{Fh_1}{h_2}, \quad (3.1.)$$

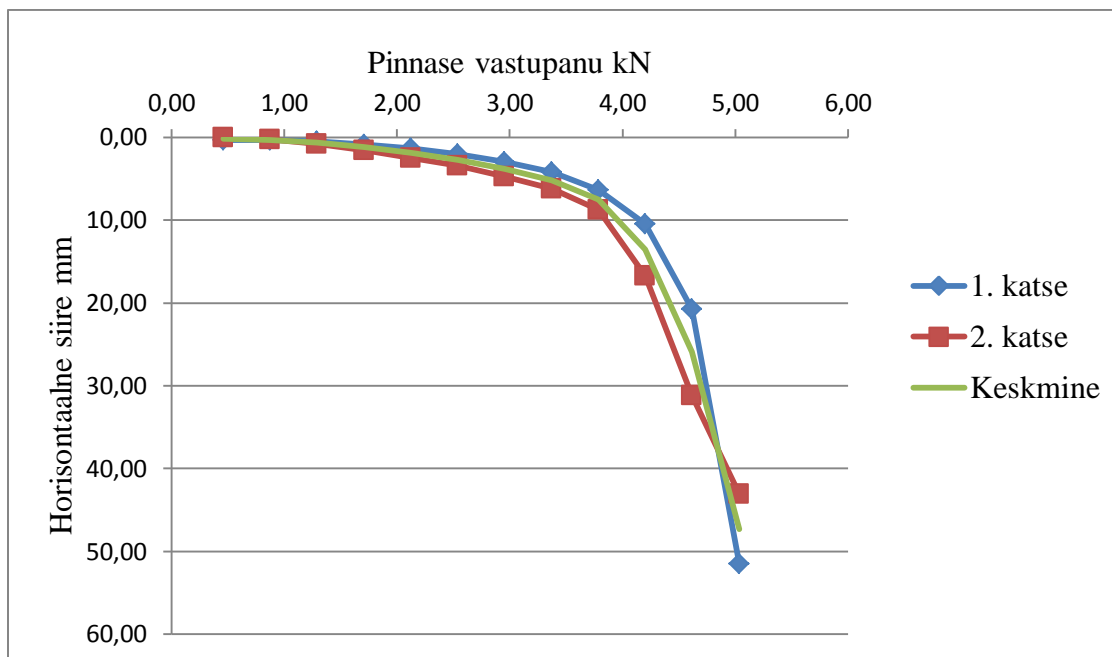
kus  $N_y$  on pinnase vastupanu kN;

$F$  on koormamissilindri poolt rakendatud jõud kN;

$h_1$  on koormamipunkti kaugus ülemisest toest m;

$h_2$  on vaia keskme kaugus ülemisest toest m.

Pinnase vastupanu on leitud iga katse kohta eraldi ja edaspidised analüüsid toimuvad selle väärtuse põhjal. Staatilise horisontaalkandevõime graafikud olid ootuspärased, omades varasemate koormamistega sarnaseid murdepunkte. Graafikutelt on eristatav piirkond, kus vai töötab koos pinnasega, põhjustades koormuse kasvamisel lineaarse siirde ja murdepunkti, mida ületades pinnase kandevõime raugneb ja algab vaia liikumine läbi pinnase. Nimetatud murdepunkt ehk proportsionaalsuspiir on nähtav ka joonisel 3.1, kus on kujutatud raudbetoonkiilvaia KV30 horisontaalkandevõime katsed, mille tagajärjel vai purunes.



**Joonis 3.1** Raudbetoon kiilvaimudeli KV30 horisontaalsete koormamiste koondgraafik

Raudbetoonist kiilvaia KV30 kahest katsest joonistub välja tüüpilisele vaiale omane käitumine, koormustel alla 1,5 kN toimub koormuse suurenedes siirde lineaarne kasvamine. Koormuse võtab vastu eelkõige vaia külghõõre ja toimub pinnase tihenemine. Jõutakse külje vastupanupiirini ( $N_k$ ). Järgmisel lineaarsel lõigul töötab lisaks vaia külghõõrdele ka pinnas, mis hakkab kahe kuni nelja vaiapea laiuses tiheneda. 4 kN juures jõutakse pinnase optimaalse tihenemiseni ja algab pinnase väljasurumine, millega kasvab ka vajumise intensiivsus. Seda koormust kutsutakse roome- ehk proportsionaalsuspiiriks ( $N_{pr}$ ). 5 kN juures jõutakse piirkoormuseni ( $N_{piir}$ ), mis on viimane koormusaste enne pinnase purunemist. Piirkandevõime ja proportsionaalsuspiir suhtuvad teineteisesse 4/5, mis näitab, et proportsionaalsuspiir on 80% piirkandevõimest. Gersevanovi poolt täheldatu põhjal on kõige olulisem vaia kandevõime juures proportsionaalsuspiir. Graafikult joonistub välja, et enne proportsionaalsuspiiri ületamist on vajumid suhteliselt väikesed, s.o alla 10 mm, kuid  $N_{pr}$  ületades toimub järsk vajumi kasv: koormuse suurendamisel neljandiku võrra suureneb vajum enam kui kolmekordselt. Esimene katseseeria, olgugi et vaid kahe katsega, näitab head korrelatsiooni reaalses tingimustes tehtud originaalsuurustes kiilvaikatsetega. Seejuures tuleb märkida, et omavahelises võrdluses on kahe katse samade pinnase vastupanu suuruste juures siirete näidud 30–80 % erinevad. Teisel katsel toimus koormamise ajal ka katseseadmes liikumine, mis oli põhjustatud vaiapeale kinnitatud posti valesti kinnitamisest. 9 mm siirde juures

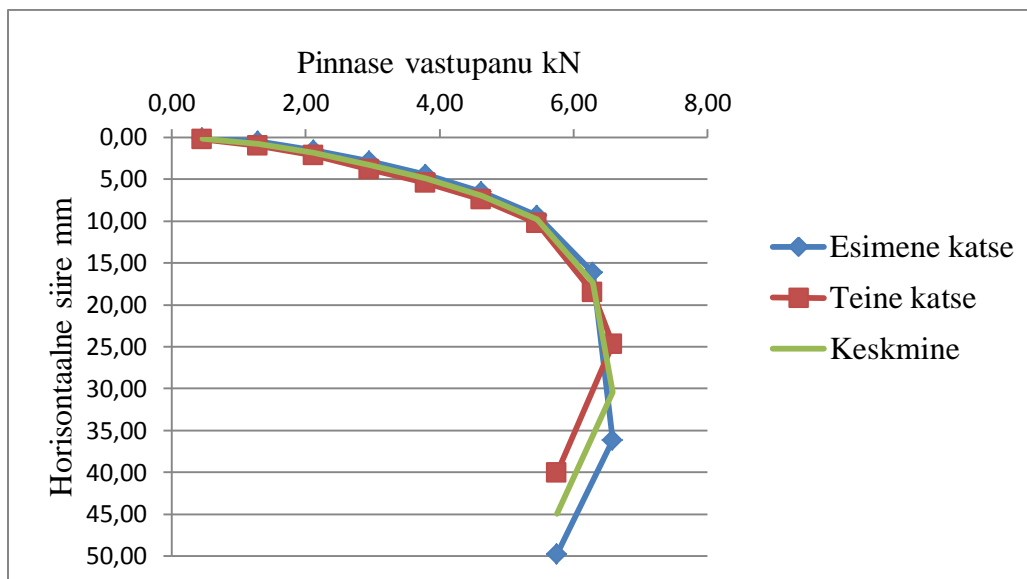
toimus postis liikumine, mis põhjustas survesilindri poolt rakendatava jõu langemist 4,1 kN juurest 2,2 kN juurde. Katseprotokollist see muutus välja ei joonistu, kuna pinnast see muutus käitumiselt ei mõjutanud, küll on muutus näna Almemo andmesalvestussüsteemi väljatrükist.

Vaia peas olev betoonikiht on keermepesade poolt nõrgestatud ja vaia rammimisel lõhub vasaralöök betooni vaiapea küljest lahti. Samuti on tõmbetsooni jääva keermelati keevitus aladimensioneeritud ja puruneb ebasoodsal koormamisel. Ebasoodsaks koormamiseks on antud juhul tõmbetsoon, mis tekib koormamispunktist vaia vastasküljel oleva keermepesa ümber. Horisontaalsuunalise koormamise järel purunenud kiilvaia on kujutatud joonisel 3.2.



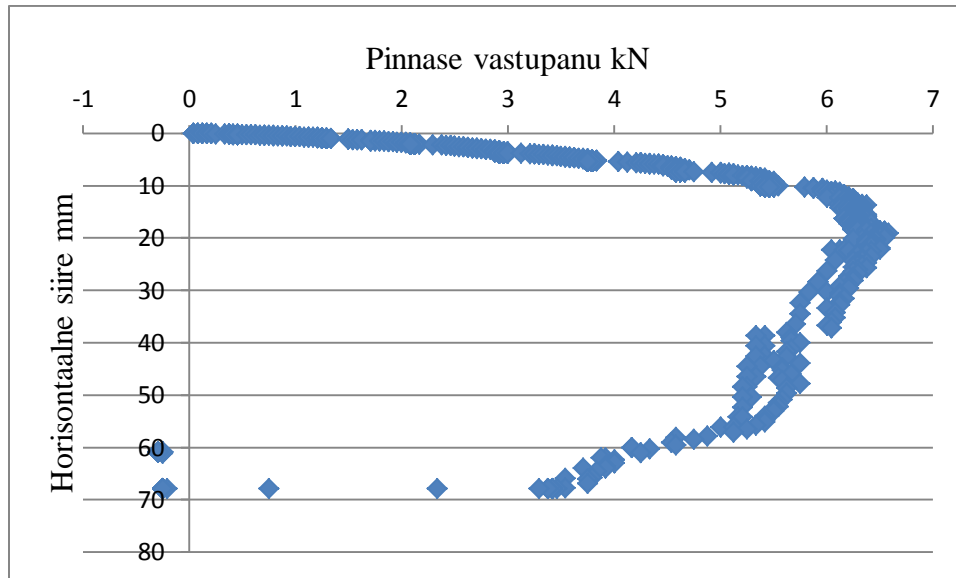
**Joonis 3.2** Kahe horisontaalkoormamise järel purunenud kiilvaimudel KV30

Raudbetoon kiilvaimudeli KV60 kahekordsel horisontaalsel koormamisel saadud tulemused kajastuvad joonisel 3.3. Sarnaselt KV30 mudelile, ei pidanud ka KV60 kummaltki poolt vastu teisele horisontaalsele koormamisele. Võrdlusandmetes on kaks katset ja nende keskmine. Graafiku üldkuju sobib taaskord vaiade koormuse ja vajumi sõltuvuse kõveraga kokku (joonis 1.3, lk 17).



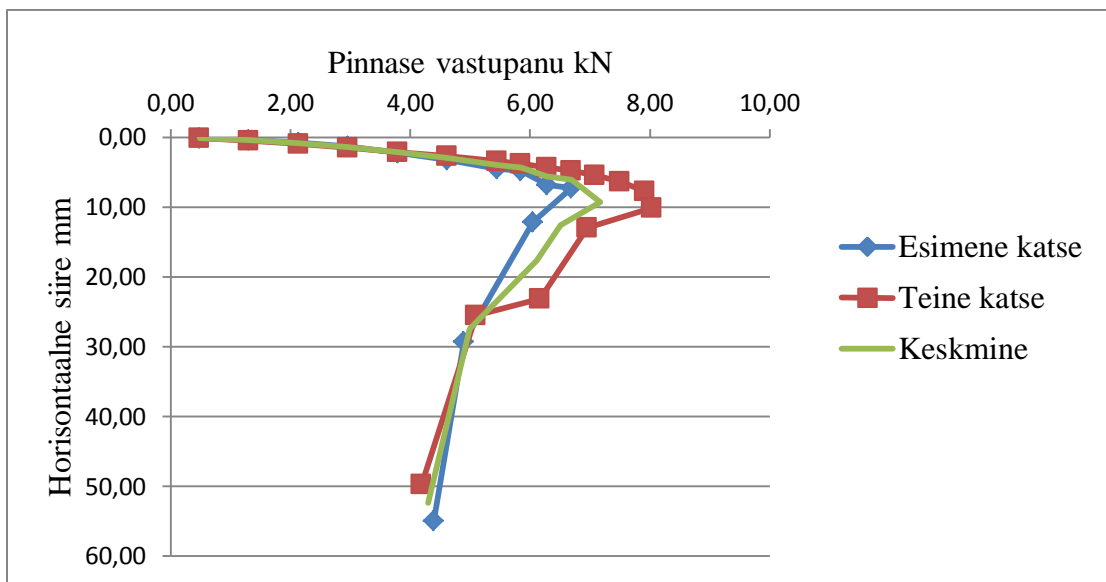
**Joonis 3.3** Raudbetoon kiilvaimudeli KV60 katsetuste graafik

KV60 kiilvaimudeli  $N_k = 2,1 \text{ kN}$ ,  $N_{pr} = 5,5 \text{ kN}$  ja  $N_{piir} = 6,6 \text{ kN}$ . Kui esimese kahe kilonjuutoni jooksul on siirdemuut alla kahe millimeetri, siis järgmise kuuendal kilonjuutonil on siire juba 17 mm. Graafikult on näha ka kandevõime vähenemine piirkoormuse ületamise järel, mis tähendab, et pinnase väljasurumisel pinnas kobeneb selle punktini, kus on lihtsam pinnase jäiknõiduse ületamise asemel vai läbi pinnase suruda. Proportsionaalsuspiir moodustab piirkandevõime väärtusest 83 % Erinevalt vertikaalsest koormamisest, kus kandevõime tõus pinnase piirkandevõime ületamisel lineaarselt suuremate siiretega jätkus, toimub horisontaalsel koormamisel piirkoormuse ületamisel pinnase kandevõime vähenemine, mida iseloomustab andmesalvestusseadme väljatrüki põhjal koostatud graafik joonisel 3.4.



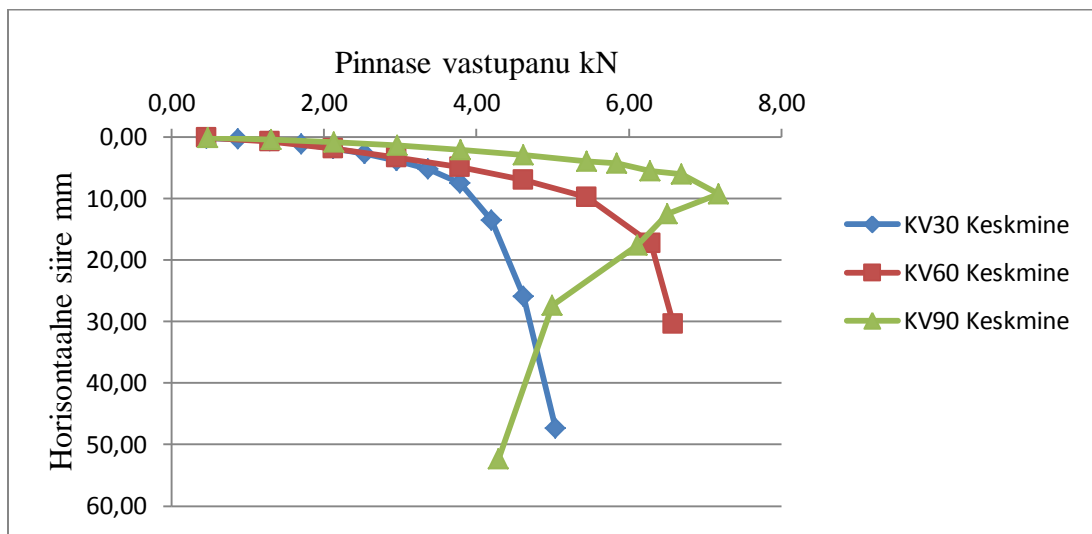
**Joonis 3.4** Andmesalvestussüsteemi väljavõte kiilvaimudeli KV60 teisest katsest

Kiilvaimudeli KV90 horisontaalsuunaline koormamine on kahe katsetuse võrdluses kuni proportsionaalsuspiirini heas korrelatsioonis: kuni 4,5 kN pinnase horisontaalvastupanuni on kahe katse siirete erinevus alla 19 % (joonis 3.5). Suurem erinevus tuleb piirkandevõime saavutamisel. Kui esimese katse puhul rauges pinnase kandevõime 6,7 kN juures, siis teisel katsel rauges pinnase kandevõime sama vaia puhul 7,9 kN juures. Siirded olid vastavalt 7 mm ja 10 mm. Graafiku esimene murdepunkt ehk külje vastupanupiir ületati 3 kN juures. Kiilvaia KV90 pinnasesse rammimise tagajärjel hakkas vaiapea mõranema ja kolmandat katset ei olnud võimalik teostada. 90 mm laiusega raudbetoonvaia katsetamisel tuli selgelt ilmsiks kandevõime raugemine, kui esimese 6 kN koormuse juures liikus vaiapea 5 mm, siis pärast aluse kandevõime raugemist oli vaia siire väiksema, 5 kN koormuse juures üle 25 mm. Selline käitumismuster näitab, et horisontaalsuunalise kandevõime määramisel ei tohiks lähtuda vaia piirkandevõimest. Proportsionaalsuspiirini jõuti mõlemal juhul 1 kN enne piirkandevõimeni jõudmist, mis annab proportsionaalsuspiiri väärtuseks 81 % piirkandevõime suurusest.



**Joonis 3.5** Raudbetoon kiilvaimudeli KV90 katsetuste graafik

Omavaheliseks võrdluseks kasutati kiilvaimudelite katsete keskmiste graafikut (joonis 3.6).



**Joonis 3.6** Kiilvaimudelite KV30, KV60 ja KV90 horisontaalkoormamiste keskmiste siirete võrdlus

Vaiadega toimuv on ootuspärane kuni roomepiiri ületamiseni, misjärel muutub koormuse ja siirde suhe kaootiliseks. Piirkoormuseni  $N_k$  jõutakse KV30 vaiade kandevõimete keskmise järgi 1,5 kN juures, KV60 vaiadel 2,1 kN juures ja KV90 vaiadel 3 kN suuruse pinnase vastupanu juures. Vaia paksuste suurenemisel toimuv kandevõimete muutumist kajastab tabel 3.1, kus on

toodud katsete keskmised kandevõimete väärtused kiilvaia mudeli kohta ja võrreldud neid KV60 mudeliga.

**Tabel 3.1** Raudbetoon kiilvaiade kandevõimete sõltuvus vaia paksusest ja kandevõimete suhe KV60-ga

		Külje vastupanupiir $N_k$		Roomepiir $N_{pr}$		Piirkoormus $N_{piir}$	
Tähis	Paksus mm	kN	Suhe	kN	Suhe	kN	Suhe
KV30	30	1,5	0,7	3,8	0,7	5	0,8
KV60	60	2,1	1,0	5,5	1,0	6,6	1,0
KV90	90	3	1,4	6,7	1,2	7,2	1,1

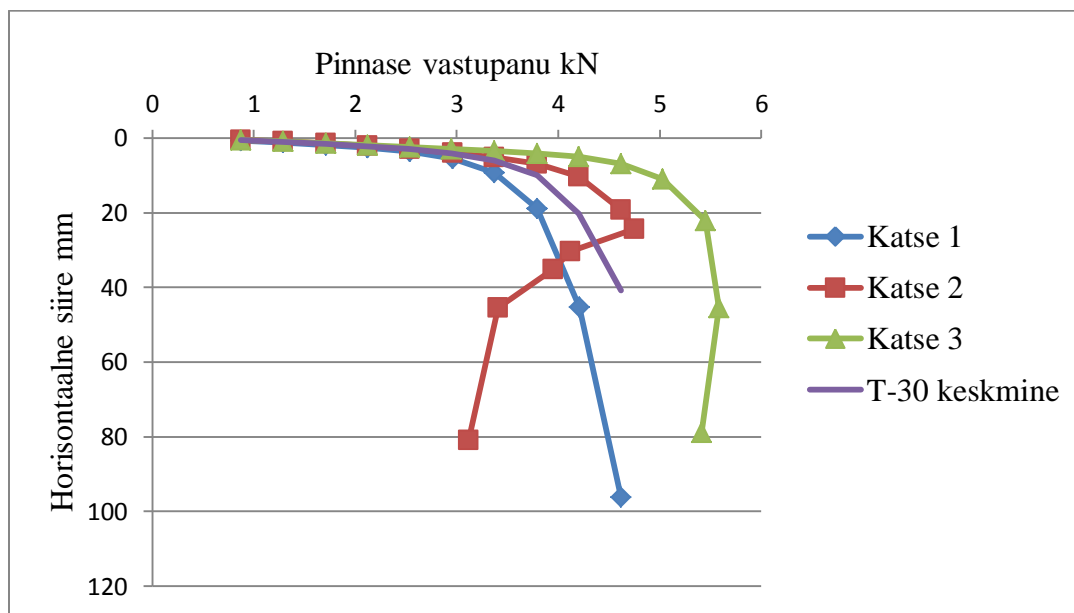
Suurendades 30 mm kiilvaia paksust kahekordseks kasvab vaia horisontaalsel koormamisel proportsionaalsuspiir 40 %, mis näitab, et kiilvaia ruumala kahekordsel suurendamisel vertikaaltahkude suunas suureneb vaia kandevõime 1,4-kordselt. Kui suurendada vaia kolmekordselt, muutub roomepiir 1,8 kordseks, mistõttu võib kolme vaiapaksuse analüüsist väita, et proportsionaalsuspiiri kasv kiilvaiade laiendamisel on lineaarne. Külgede vastupanupiir kasvab kahekordse vaiapaksuse juures 1,4-kordseks ja kolmekordse vaiapaksuse juures kahekordseks, seega kasvab külgede vastupanupiir mittelineaarselt. Piirkoormuse kasv vaia laiendamisel ei ole teiste iseloomulike koormuspunktidega võrreldes nii suur. Katsete põhjal võib väita, et piirkoormus kasvab vaia külgsuunas kolmekordsel laiendamisel vaid 40 %.

### 3.1.2. Terasest kiilvaimudelid

Raudbetoon kiilvaimudelid vahetati terasest mudelite vastu ja lisati uue pikkusega kiilvai T-60-500. 500 mm pikkune kiilvai on võrdluseks 400 mm pikkusele kiilvaiale T-60, et selgitada muutust kandevõimes vaia pikkuse suurenemise korral. Katsetulemuste analüüsist selgus, et terasest kiilvaiade katsetulemused ei kattu omavahel nii suures ulatuses, kui seda tegid raudbetoonvaiad. Joonisel 3.7 on välja toodud kiilvaia T-30 katsetused. Kõigi kolme katsetulemuse graafikute esimene osa, kuni pinnase vastupanuni 3 kN, on tulemused ühtlased ja siirded ei ole väga erinevad. Erinevate katsetuste vaia külgede vastupanupiir on ühtlaselt välja



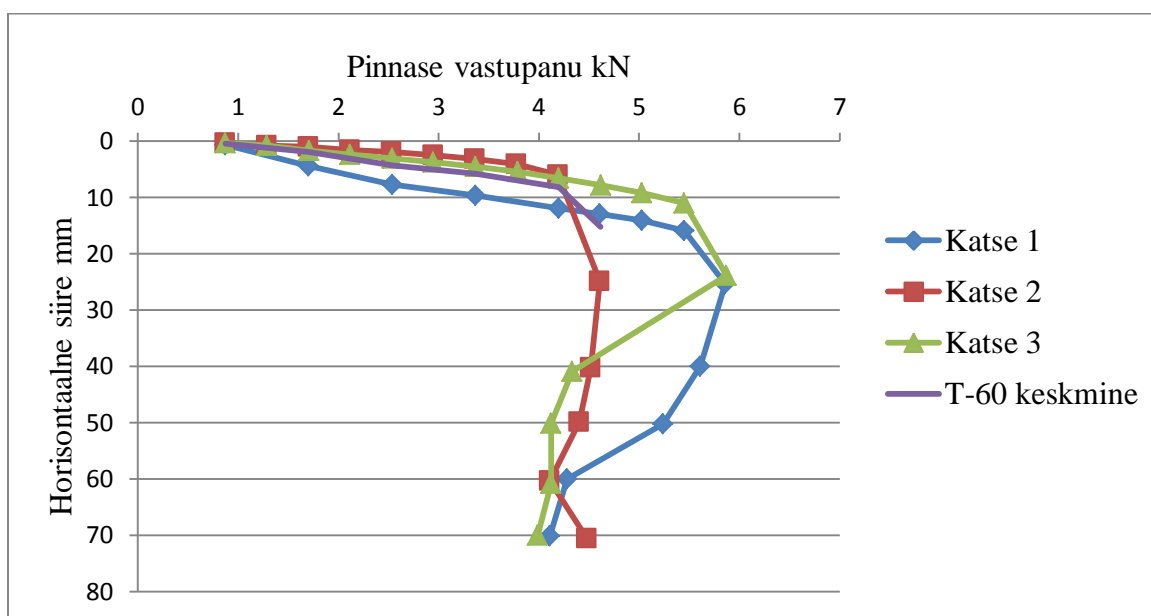
joonistunud, jäädes 2-3 kN piiridesse. Proportsionaalsuspiiri näitajad nii ühtlaselt välja ei joonistu. Esimesel katsel on pinnase väljasurumine alanud juba 3,4 kN juures, teisel katsel 3,8 kN juures ja kolmandal 4,6 kN juures. Tulemuste erinevusel võib rolli mängida pinnase ebaühtlane tihenemine, või vaiade süvistamisel toimunud kõrvalekalded. Teise katse graafikult on näha, et sarnaselt suurema paksusega betoonvaiale väheneb 30 mm paksusega terasest kiilvaimudeli puhul pinnase kandevõime drastiliselt. Kui piirkoormus 4,6 kN on ületatud, langeb pinnase kandevõime ja jääb püsima alles 3,1 kN juures, lükates vaia pinnases 55 mm edasi. Sarnane muster joonistus välja ka kolmandal katsel, kuid siis rauges pinnase kandevõime 5,6 kN suuruse vastupanu juures.



**Joonis 3.7** Teraskiilvaia T-30 horisontaalkoormamise graafik

T-60 kiilvaia horisontaalkandevõime koondgraafikul (joonis 3.8) on vaadeldavad tüüpilised vaia kandevõimete piirid, kuid erinevalt T-30 vaia pinnase vastupanu väärtustest, on T-60 kiilvaimudeli erinevate katsete külje vastupanupiiri väärtused suurema erinevusega. Esimesel katsel on suure tõenäosusega jäänud pinnas vaia ümber kohevamaks, toimuvad koormuse rakendamise algusest suuremad vajumid kui kahel järgmisel katsel, kuid piirkandevõimeni jõutakse 6 kN juures, nagu teise katse puhul. Kirjanduse analüüsis käsitletud optimaalse tiheduse saavutamine vaia koormamisel kirjeldab tekkinud olukorda: esialgu kohevamasse pinnasesse rammitud vai esimesel katsel hakkab koormamise järgselt pinnast tihendama ja on kandevõimelt

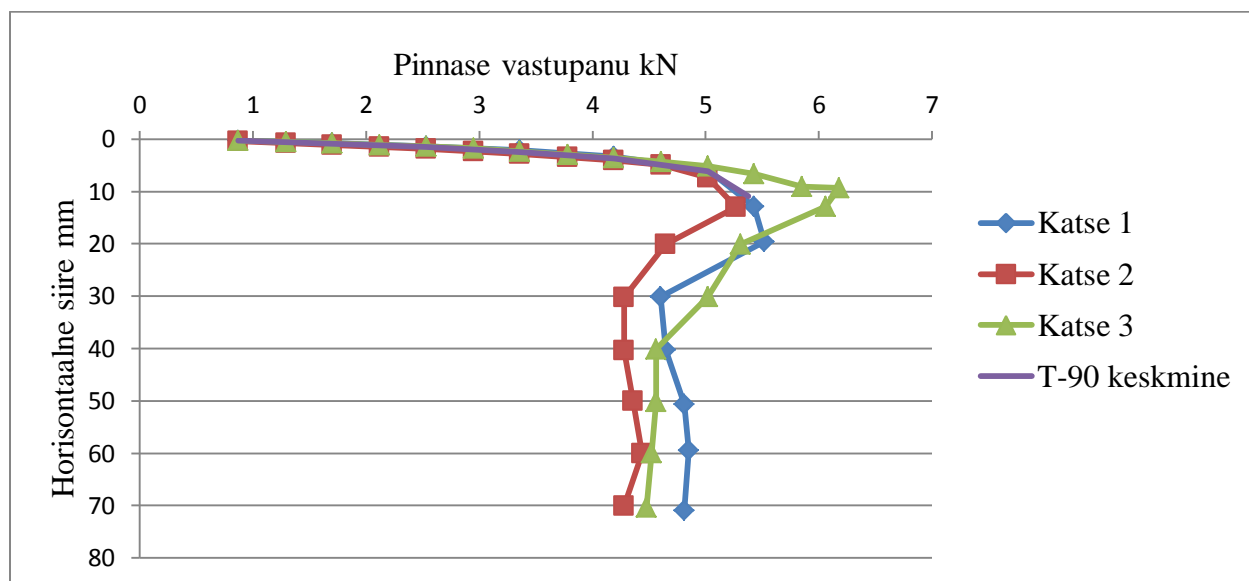
võrdväärne tihedamasse pinnasesse rammitud vaiaga kolmandal katsel. Kiilvaia piirkandevõime vähenemine teisel katsel võib olla tingitud liiga kiirest koormamisest, kus pinnase sidemed lõhuti ja pinnas ei suutnud vaia läbisurumist takistada. Esimese katse horisontaalkandevõime vaia külgede poolt vastuvõetava koormuse osas on väärtuselt teistel katsetel saavutatust väiksem. Teisel katsel on proportsionaalsuspiir tunduvalt varem ületatud, kui esimesel ja kolmandal katsel. Sellegipoolest on katsete keskmine joonistunud välja iseloomulike lõikudena, kus  $N_k$ -ni jõutakse 2,5 kN juures ja  $N_{pr}$ -ni 4,2 kN juures. Katsete keskmise piirkandevõime  $N_{piir}$  suurus jääb 4,6-5,5 kN vahemikku.



**Joonis 3.8** Teraskiilvaia T-60 horisontaalkoormamise graafik

Terasest kiilvaiade horisontaalsel koormamisel on kolme katse kõige ühtlasemad kandevõimed saadud kiilvaimudeli T-90 koormamisel (joonis 3.9). Vaia küljed on töötanud koormuse vastuvõtmisel kuni 1,7 kN pinnase vastupanu suuruseni, jättes siirde 1,5 mm piiresse. Sealt edasi on hakanud ka pinnas tööle, moodustades lineaarse kandevõime kasvu 4,5 kN-i ja põhjustades siiret 6,1 mm. Sarnaselt kitsamatele terasest kiilvaimudelitele, tulevad T-90 terasvaia kolme katse suuremad erinevused sisse just proportsionaalsuspiirini jõudes. Kolmest katsel kahel on  $N_{pr}$  ületatud 5,0 kN juures, kolmandal katsel on sama näitaja 5,5 kN. Piirkoormus ületati erinevatel katsetel 5,3 kN, 5,5 kN ja 6,2 kN suuruse pinnase vastupanu juures, mis igal katsel tähendas pinnase kandevõime vähenemist. Vaia kandevõime jäi pinnase raugemise järel püsima vastavalt

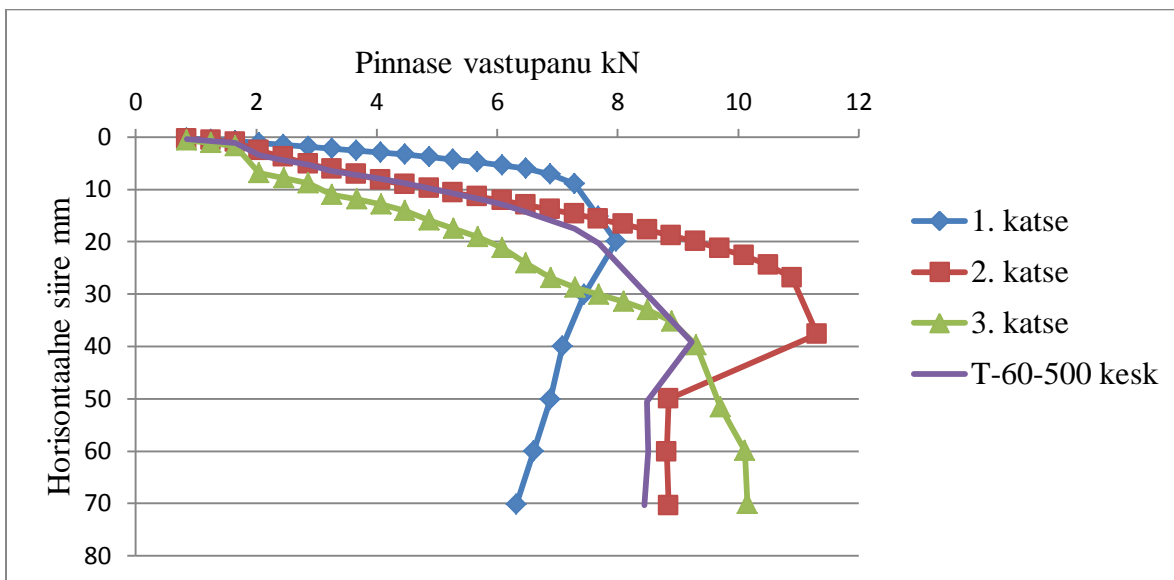
4,3 kN, 4,6 kN ja 4,6 kN juures, põhjustades enne seda 10 kuni 30 mm horisontaalset siiret. Kuna koormamisel toimub vaia vahetus ümbruses oleva pinnase tihendamine, siis pinnase kandevõime ületamise järel lükatakse vaia pinnases kuni jõutakse piisavalt tihenenud pinnaseni. Sel korral oli tihenenum pinnas vaia küljest 30 mm kaugusel.



**Joonis 3.9** Teraskiilvaia T-90 horisontaalkoormamise graafik

Terasest kiilvaimudel T-60-500 horisontaalse koormamise erinevate katsete vahel head korrelatsiooni ei näidanud. Iga katse graafikul on selgelt näha muutused koormuse ja siirde omavahelises suhtes, kuid puuduvad sarnased punktid. Esimese katse algus on paljulubav. Külje vastupanu piirini jõutakse 2,1 kN juures, millele järgneb pinnase tihenemine järgmise 6 mm jooksul. See annab proportsionaalsuspiiri väärtuseks 6,9 kN. Katseseeria esimene katse lõpeb kõige väiksema kandevõime juures. Piirkandevõime väärtuseks 8,0 kN 20,0 mm siirde juures. Järgmise 50 mm siirde jooksul väheeb pinnase kandevõime väärtuseni 6,3 kN. Teise katse  $N_k$  ületati 1,7–2,1 kN vahel, millele järgnes kandevõime kasv kuni 10,5 kN ja 24,4 mm siirdeni.  $N_{pr}$  väärtuseni jõuti ligikaudu 10,9 kN suuruse vastupanu juures ja pinnase kandevõime rauges 11,3 kN juures. Kandevõime vähenemine stabiliseerus pärast 12 mm pikkust siiret ja jäi pidama 8,8 kN juurde. Kolmanda katse kandevõimegraafik erineb kuju poolest, näidates suuremaid vajumeid külje vastupanu piiri ületamisel ( $N_k = 1,65$  kN) ja pinnase tihenemise lõikudes. Proportsionaalsuspiiri 8,9 kN suuruse pinnase vastupanu juures on siire 35,2 mm. Kandevõime raugemist enne katse lõpetamist mõõtmispiiridesse ei jää. Katse lõppedes on kandevõimegraafik

tõusvas joones 10,2 kN suuruse pinnase vastupanu ja 70 mm siirdega. T-60-500 kolme katse keskmised piirväärtused on:  $N_k = 1,65$  kN,  $N_{pr} = 7,3$  kN,  $N_{piir} = 9,23$  kN.

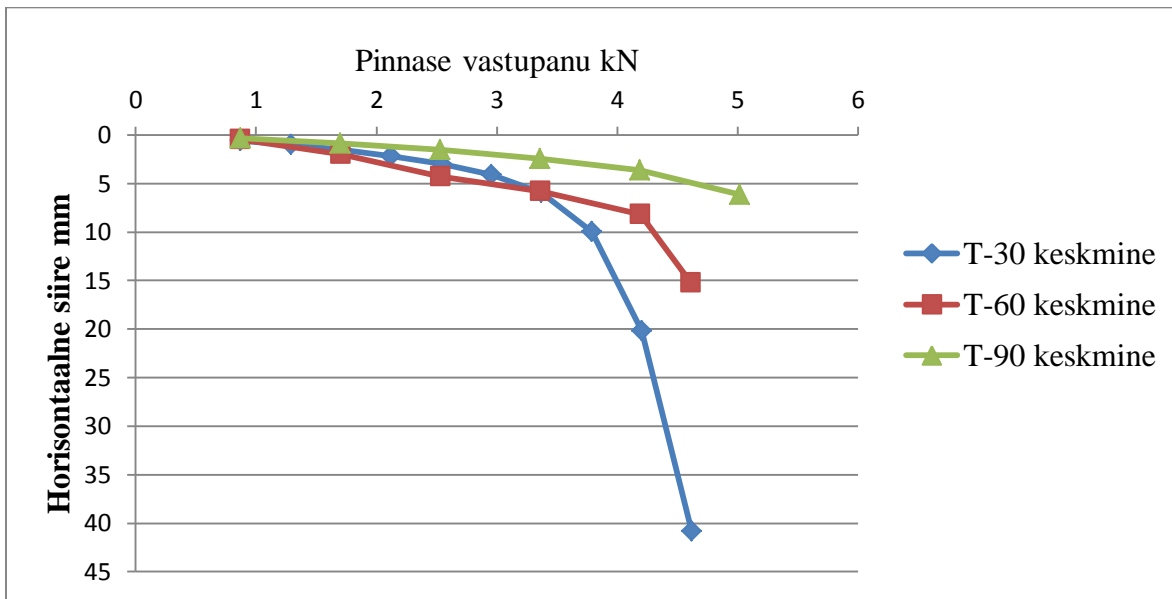


### Joonis 3.10 Teraskiilvaia T-60-500 horisontaalkoormamise graafik

Terasest 400 mm pikkuste kiilvaimudelite keskmiste võrdlus (joonis 3.11) ei kajasta lineaarset seost ühegi iseloomuliku koormuspunkti vahel. Külje vastupanupiir ei suurene vaia laienedes viisil, nagu ta suurenes raudbetoonvaia puhul. See on tingitud erinevast hõõrdetegurist. Betooni ja liiva vaheline hõõrdetegur on 0,6, liiva ja terase vaheline 0,3. Kuna  $N_k$  kajastab vaia külgede vastupanupiiri, siis mängib selle näitaja määramises rolli pindade vaheline hõõrdetegur. Proportsionaalsuspiir suureneb vaiale kahekordse paksuse lisamisel 11 % (tabel 3.2), mis on märkimisväärselt väiksem raudbetoonist vaia 40 % suurusest kandevõime kasvust. Samuti on piirkandevõime suurenemine kiilvaiade paksuse muutmisel tunduvalt väiksem. Kui raudbetoonvaiadega oli vaia paksuse muutmisel kandevõime kasv võrreldav suurus, siis terasest vaiade puhul jääb selle suuruse muut alla 20 %.

**Tabel 3.2** Terasest kiilvaiade kandevõimete sõltuvus vaia paksusest

		Külje vastupanupiir $N_k$		Roomepiir $N_{pr}$		Piirkoormus $N_{piir}$	
Tähis	Paksus mm	kN	Suhe	kN	Suhe	kN	Suhe
T-30	30	2	1,18	3,8	0,90	4,6	1,00
T-60	60	1,7	1,00	4,2	1,00	4,6	1,00
T-90	90	2,5	1,47	5	1,19	5,4	1,17

**Joonis 3.11** Terasest kiilvaiade T-30, T-60 ja T-90 katseliste keskmiste kandevõimete võrdlus

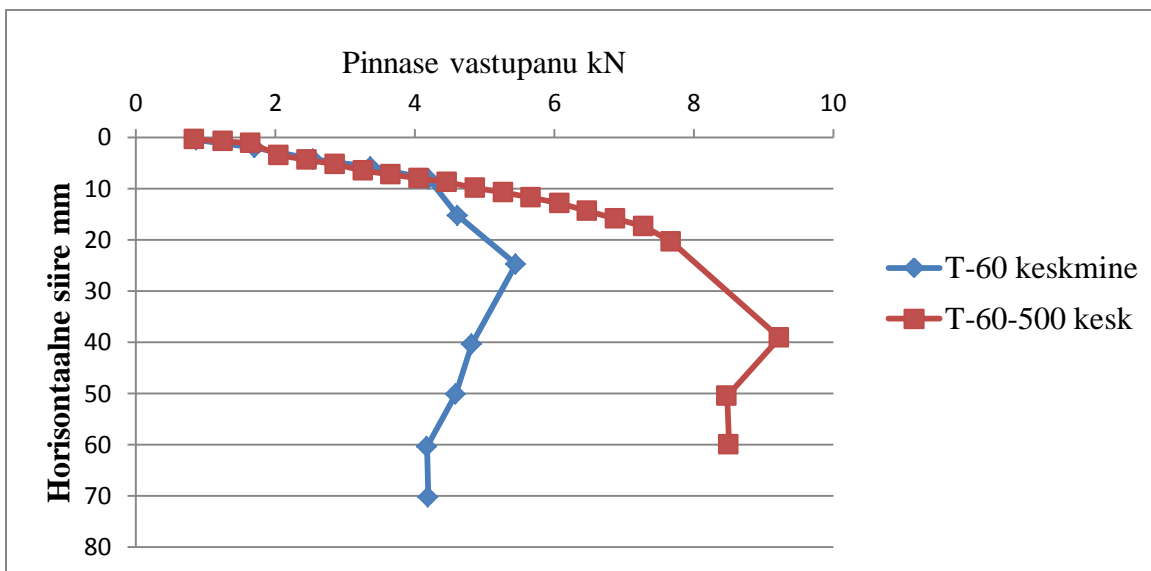
Pikendatud terasvaia T-60-500 kandevõime 60 mm paksusega T-60 kiilvaiaga võrreldes on esitatud tabelis 3.3. Vaia kolme katse keskmiste graafiku võrdluste alusel ilmneb, et külje vastupanupiir on sügavamale süvistatud vaial väiksem. See ei saa olla tõene, kuna pikemal vaial on suuremad pinnad, mis mängivad hõõrdejõu suurusel olulist rolli. Tõenäoliselt on tegemist katsete jooksul tekkinud anomaaliatega. Roomepiir suureneb pea kahekordselt, mis on tulus, kuna vaia ruumala kasvab 50 % ulatuses. Sama suhe on ka piirkoormuse kasvuga, mis on ajavahemikus 1981–1983 Võru ja Tartu rajooni saviliivmoreenpinnases tehtud kiilvaiade vertikaalkoormuskatsete uurimisel saadud andmetega vastuolus. Teostatud uuringute põhjal väideti, et sama betoonikulu juures on otstarbekam suurendada vaia külgede suunas, mitte pikkuse. Seevastu Maaülikooli laboris tehtud katsete põhjal ilmneb, et vaia mahu suurendamine paksuse arvelt 50 %, annab kandevõimele juurde 20 % ning vaia mahu suurendamine pikkuse

arvelt 50 % annab kandevõimele pea kahekordse väärtuse. Vastuolu katsetulemuste vahel võib põhjendada erinevustega katsete läbiviimise tehnoloogias. Varasemates katsetes suruti vaiapead pinnases viisil, mil vaia pööre ei olnud takistatud. Vaia hakati pinnases ümber keskmee pöörata. Eeldatavasti oli selleks keskmeks vaia alumine kolmandik. Kaldtahkudel tekkisid tõmmatud ja surutud tsoonid, üks keskmest kõrgemal ja teine madalamal. Kuna pinnase vastupanu sügavuti suureneb, siis vaia pöörlemisel töötab aktiivsemalt vaia ülemine pool. Laiemal vaial on ka kaldpinna pindala suurem, mistõttu saavutati laiema vaiaga pikemast vaiast suurem horisontaalkandevõime. Pinnasega ristisuunas on pikemat vaia raskem liigutada, kuna sügavuse kasvades pinnase aktiivsurve suureneb ja pikemal vaial on pinnaühiku kohta rohkem pinnase vastupanu kui laiemal vaial.

**Tabel 3.3** Kiilvaiade T-60 ja T-60-500 kandevõimete võrdlus

		Külje vastupanupiir $N_k$		Roomepiir $N_{pr}$		Piirkoormus $N_{piir}$	
Tähis	Paksus mm	kN	Suhe	kN	Suhe	kN	Suhe
T-60	60	1,7	1,00	4,2	1,00	4,6	1,00
T-60-500	60	1,65	0,825	7,3	1,92	9,23	2,01

Vertikaalsuunaliste kandevõimete erinevus tuleb ilmsiks ka pinnase vastupanu graafikult 3.12. Kuni proportsionaalsuspiirini on 60 mm paksuse kiilvaia lühema ja pikema variatsiooni kandevõimed võrdsed. Pikem kiilvai jätkab sama vajumi suhtega kandevõime kasvu, kuni saavutab lühema vaia kahekordse kandevõimepiiri, saades T-60-500 proportsionaalsuspiiri väärtuseks ligikaudu kahekordse T-60 proportsionaalsuspiiri väärtuse.



**Joonis 3.12** Kiilvaiade T-60 ja T-60-500 horisontaalsuunalise kandevõime võrdlus

Horisontaalkandevõime katsetulemuste graafikud olid raudbetoon kiilvaimodelite puhul ühtlasemad ja kandevõimete iseloomulikud punktid langesid omavahel paremini kokku, kui terasest kiilvaiade piirkoormused. Terasest kiilvau tuleks paremaks võrdluseks raudbetoonist vaiadega ka vertikaalselt katsetada. Katsete protokollid on välja toodud lisas B.

### 3.2. Horisontaalkandevõime sõltuvus vertikaalkandevõimest

Kiilvaimodelite kandevõimet hinnati dünaamilisel meetodil. Kandevõime määramiseks kasutati Gersevanovi valemit, mis 2015. aasta Erko Varese magistritöös näitas sobivust ja head korrelatsiooni kiilvaimodelite staatilisel koormamisel saadud tulemustega. Iga vaia maasse rammimise järel tehti viimase kolme löögi eel ja järel vaiapea kõrguse mõõtmine, et hiljem arvutada dünaamilisel meetodil vaia vertikaalne kandevõime. Kolme löögi järel saadud süvistumisvahemaa jagati löökide arvuga, et saada vajumi vaste väärtus. Vaia vasted on kohevamas pinnases suuremad kui tihedas. See põhjendab variatsioone samade kiilvaimodelite horisontaalkoormamise tulemustes tekkinud erinevate piirkoormuste vahel.

Dünaamilise kandevõime arvutus lähtub Erko Varese magistritöös leitud seosele Gersevanovi valemiga arvutatud kiilvaia vertikaalkandevõime ja staatilisel koormamisel saadud kandevõime

vahel. Erko Varese töös on leitud, et käsitletud kujul Gersevanovi valem (valem 3.1) sobib kiilvaimudelite kandevõime hindamiseks, jättes pigem natukene kandevõime varu staatilise koormuskatsel saadud kandevõime näitajale.

Erko Varese magistrیتöös kasutatud Gersevanovi valem on esitatud järgmisel kujul [11]:

$$R_{c;m} = \frac{\eta A}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{4m_1 H}{\eta A s_e} \frac{m_1 + 0,2m_2}{m_1 + m_2}} - 1 \right] g, \quad (3.1)$$

kus  $A$  on vaia ristlõikepindala, Erko Varese töös on kasutatud vaia keskmist ristlõikepindala  $\text{cm}^2$ ;

$m_1$  – vasara kaal t;

$m_2$  – vaia ja kaitsepea kaal t;

$s_e$  – vaia vajum ühest löögist cm;

$H$  – vasara langemiskõrgus;

$g$  – raskuskiirendus  $\text{m/s}^2$ ;

$\eta$  – vaia materjalist sõltuv tegur  $\text{t/m}^2$ ;

Rakendades valemit 3.1, arvutatakse katsetatud kiilvaimudelite proportsionaalsuspiirid. Valemiarvutusteks vajalikud tegurid on kajastatud tabelis 3.4. Valemi põhjal tehtud arvutuste tulemused on esitatud tabeli viimases veerus.



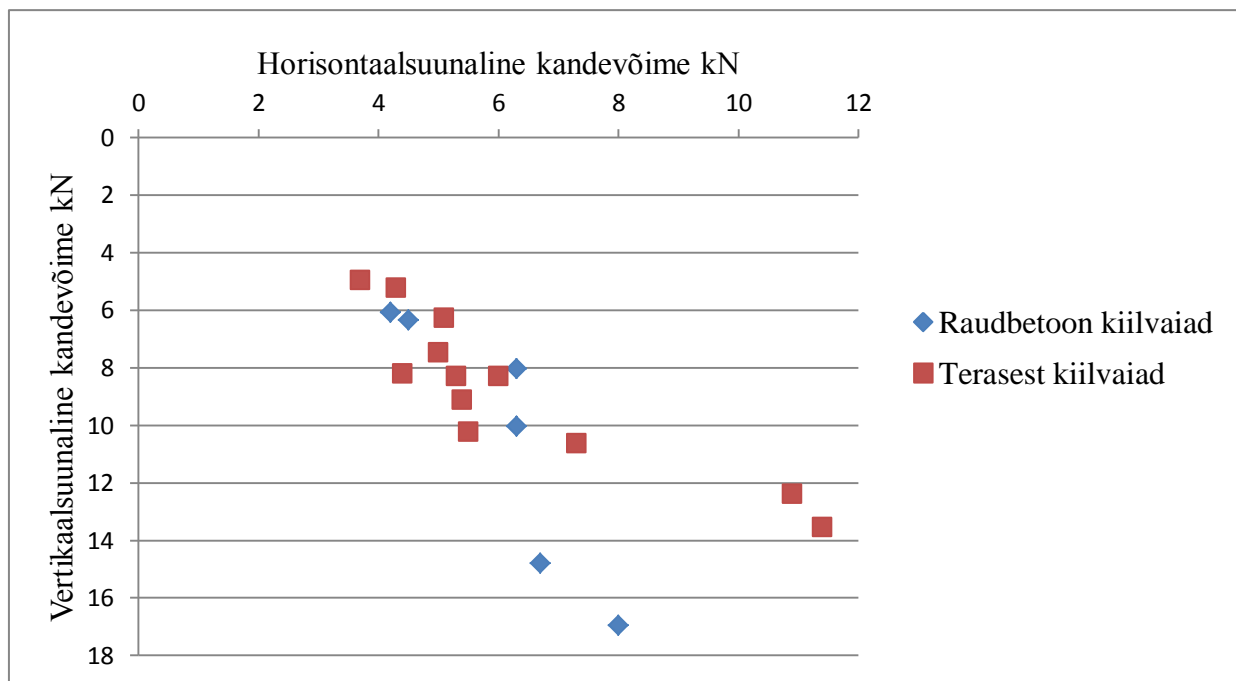
**Tabel 3.4** Kiilvaimudelite andmed katsete järgi, Gersevanovi valemiga hinnatud kandevõime

Mudeli tähis	Katse nr	$s_e$ cm	h	$m_1$ t	$m_2$ t	H cm	A $cm^2$	gm/s <sup>2</sup>	$R_{c,m}$ kN
KV30	1	0,550	150	0,007572	0,002807	60	21,15	9,81	6,35
	2	0,575	150	0,007572	0,002807	60	21,15	9,81	6,07
KV60	1	0,544	150	0,010053	0,004889	60	40,8	9,81	8,03
	2	0,305	150	0,007572	0,004889	60	40,8	9,81	10,02
KV90	1	0,267	150	0,010034	0,007105	60	62,79	9,81	14,78
	2	0,233	150	0,010034	0,007105	60	62,79	9,81	16,94
T-30	1	0,633	100	0,007572	0,00444	60	20,25	9,81	4,96
	2	0,600	100	0,007572	0,00444	60	20,25	9,81	5,23
	3	0,500	100	0,007572	0,00444	60	20,25	9,81	6,28
T-60	1	0,300	100	0,007572	0,007078	60	40,5	9,81	9,11
	2	0,333	100	0,007572	0,007078	60	40,5	9,81	8,21
	3	0,267	100	0,007572	0,007078	60	40,5	9,81	10,24
T-90	1	0,300	100	0,007572	0,009336	60	61,2	9,81	8,29
	2	0,333	100	0,007572	0,009336	60	61,2	9,81	7,47
	3	0,300	100	0,007572	0,009336	60	61,2	9,81	8,29
T-60-500	1	0,233	100	0,007572	0,009439	60	48,6	9,81	10,63
	2	0,200	100	0,007572	0,009439	60	48,6	9,81	12,39
	3	0,267	100	0,010034	0,009439	60	48,6	9,81	13,54

Võrdluseks arvutame kiilvaia KV60 kandevõime Gersevanovi valemiga kujul, mis on antud normis SNiP 2.02.03-85 (valem 1.1, lk 13):

$$F_u = \frac{1500 \cdot 40,8 \cdot 10^{-4} \cdot 1}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{4 \cdot 9,81 \cdot 0,010 \cdot 0,6}{1500 \cdot 40,8 \cdot 10^{-4} \cdot 0,005} \frac{0,010 + 0,2(0,004 + 0,001)}{0,010 + 0,004 + 0,0009}} - 1 \right] = 4,59 \text{ kN}$$

Sama valemi kandevõimed erinevad teineteisest 57 %. Arvutusnormide kogum SNiP pakub välja valemi, mille järgi saadakse kiilvaia KV60 proportsionaalsuspiiriks 4,59 kN. Erko Varese magistritöös kasutatud valemi järgi arvutades tuleb kandevõime 3,44 kN võrra suurem ehk 8,03 kN. Võimalik, et Erko Vares on teinud ühikute teisendamisel vea, kuid kuna 2015. aasta katsetes leiti valemiga arvatut ja staatilisel koormamisel saadud tulemustega samas suurusjärgus tulemused, siis võetakse võrdlustes aluseks Varese poolt kasutatud Gersevanovi valemi tõlgendus. Joonisel 3.13 on välja toodud horisontaalsteljel kiilvaiade kandevõimete horisontaalsuunalised komponendid ja vertikaalsteljel vertikaalsuunalised kandevõimed.



**Joonis 3.13** Kiilvaimudelite vertikaalsete ja horisontaalsete kandevõimete võrdluse graafik.

Raudbetoon kiilvaimudeli KV30 vastete järgi arvutatud vertikaalkandevõime ehk vertikaalkoormamise proportsionaalsuspiir saavutatakse 6,35 ja 6,07 kN juures, saades arvutuste keskmiseks 6,21 kN. Sama kiilvaia staatilise horisontaalkoormamise kahe katse väärtuste hindamise alusel leiti proportsionaalsuspiiriks ligikaudu 3,8 kN, mis moodustab 61 % kiilvaia arvutuslikust vertikaalsuunalisest kandevõimest.

KV60 mudeli dünaamilise koormuskatse arvutusväärtuste (8,03 ja 10,02 kN) keskmine proportsionaalsuspiir on 9,03 kN. Horisontaalsuunalisel koormamisel hakati pinnast välja suruma 5,5 kN juures. Horisontaalsuunalise staatilise katsetuse proportsionaalsuspiir moodustas 61 % dünaamilisel meetodil leitud vertikaalsest kandevõimest.

KV90 mudeli vertikaalne proportsionaalsuspiir on ühel katsel 14,78 kN ja teisel 16,94 kN. Katsete keskmiseks 15,86 kN. Staatilisel koormamisel on saadud horisontaalsuunalise koormamise proportsionaalsuspiiriks 6,7 kN, moodustades arvutuslikust vertikaalsest kandevõimest 42 %.

T-30 mudeli kolme katse vastete alusel dünaamilisel meetodil arvatud vertikaalne kandevõime on esimese katse korral 4,96 kN, teise katse korral 5,23 kN ja kolmanda katse korral 6,28 kN. Katsete keskmine kandevõime on 5,49 kN. Staatilisel horisontaalsel koormamisel on kandevõimete keskmine 3,8 kN, mis on 69 % arvutuslikust vertikaalsest kandevõimest.

Vastavalt teostatud katsetele oli T-60 mudeli kolme katse arvutuslik vertikaalkandevõime 9,11 kN, 8,21 kN ja 10,24 kN. Katsete arvutuslik keskmine tuleb 9,19 kN. Horisontaalsel koormamisel saadi roomepiiriks 4,2 kN, moodustades 46 % vertikaalsest kandevõimest.

T-90 kiilvaimudeli esimese ja kolmanda katse dünaamilisel meetodil leitud vertikaalkandevõime on 8,29 kN ja teisel katsel 7,47 kN. Arvatud keskmine on 8,02 kN. Staatilisel koormamisel saadud horisontaalkandevõime väärtus on 5,0 kN, moodustades 62 % vertikaalsuunalise koormamise proportsionaalsuspiirist.

T-60-500 kiilvaia vertikaalne kandevõime dünaamilisel meetodil on vastavalt katsetele 10,63 kN, 12,39 kN ja 13,54 kN. Arvutuslikuks keskmiseks on 12,19 kN. Staatilise horisontaalse koormamise proportsionaalsuspiiri keskmine väärtus on 7,3 kN. Kolmel staatilisel koormuskatsel saadud proportsionaalsuspiir moodustab 60 % arvutusliku vertikaalse kandevõime väärtusest.

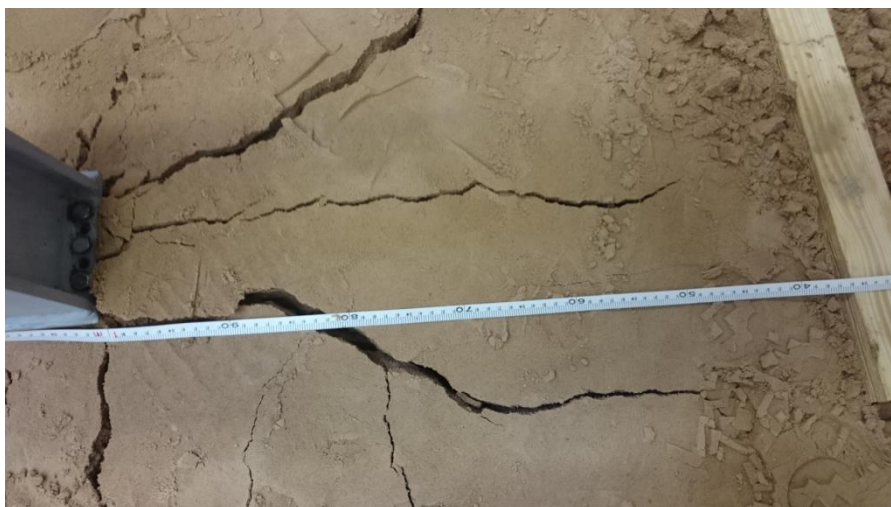
### **3.3.Koormamisel tekkinud pinnasedeformatsioonid**

Pinnases toimuvaid muutusi katse teostamise ajal ei mõõdetud. Katse järel vaadeldi pinnasega toimunud muutusi, pöörates eelkõige tähelepanu sellele, kuidas vaia horisontaalne siirdumine oli põhjustanud pinnasesse pragusid. Katsetest nähtus, et pinnas töötas katsetel kaasa, põhjustades pragusid risti koormamissuunaga koormatava külje vastastahu tasapinnas. Raudbetoon kiilvaiade koormamisel tekkisid pinnases praod sõltuvalt vaia paksusest. KV30 mudeli esmakordsel koormamisel (piirkandevõime 5,0 kN) pragunes pinnas umbes 150 mm ulatuses ehk vaia viiekordse paksuse jagu, mõjutades pinnast ka diagonaalis koormamissuunaga vastupidisel suunal (joonis 3.14).



**Joonis 3.14** Pinnase jäävad deformatsioonid KV30 kiilvaia katsetamise järel

Vaia paksuse kasvades kasvas ka vaia poolt mõjutatav pinnas. Kiilvaia KV90 koormamise järel (KV90 esimene katse  $N_{piir} = 6,7$  kN, joonis 3.15) ulatusid praod pinnases ligi 550 mm kaugusele. Siinkohal tuleb silmas pidada, et vaatlused on teostatud koormamise järel ja ei ole võimalik tuvastada, mis hetkel praod pinnasesse tekkisid. Tehtud piltide põhjal võib väita, et vaia horisontaalne koormamine kaasab vaia kandevõimesse pinnast kahelt poolt enam kui 90 kraadise nurga all koormamise suunast ja piki koormamise suunda enam kui viie vaia paksuse ulatuses.



**Joonis 3.15** Kiilvaia KV90 horisontaalse koormamise tagajärjel tekkinud pinnasedeformatsioonid

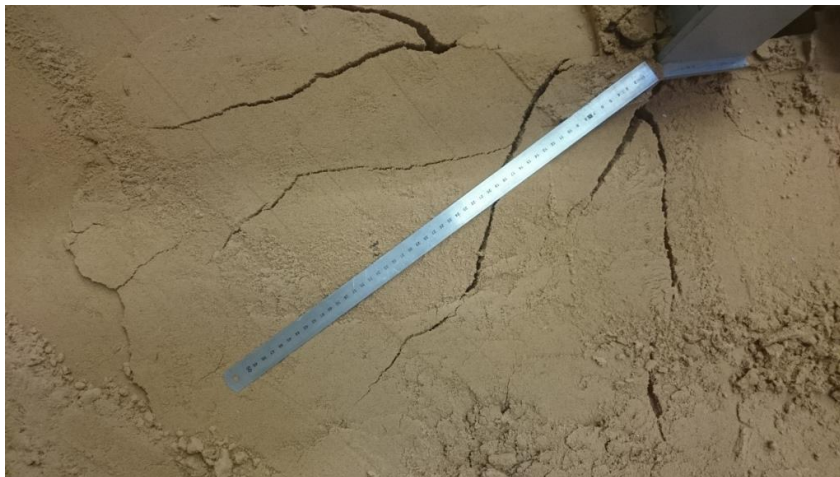
Kiilvaimudelid KV30 ja KV90 on mõlemad 400 mm pikad, järelikult määrab pinnase deformatsioonide juures rolli vaia paksus. Kolm korda laiema vaia praod ulatusid pinnases üle kolme korra kaugemale, sealjuures piirkandevõime erinevus kahel vaial oli 25 %.

T-60 terasest kiilvaimudeli esimese koormamise järel tekkinud praod on liigutanud pinnast plaadina (joonis 3.16). See põhjustas suuremaid pragusid risti koormamise suunaga vaia kaldtahust mõne sentimeetri kaugusel ja tihendades vaia ette jäävat pinnast piisavalt, et seda kogu mahus ühtlaselt liigutada. Pinnasesse tekkinud pragude maksimaalne kaugus jääb vaiapeast ligikaudu 400 mm juurde. Katsetuse maksimaalne mõõdetud pinnase vastupanu on 5,9 kN juures, kui vai on siirdunud 17 mm. Olgugi et koormamise alguses on katseesadmete pind pinnasekasti tasapinnast 10–15 cm kõrgemal, on katse lõpuks ligikaudu 72 mm horisontaalsuunalise siirde juures tõusnud pinnas piisavalt, et ületada vaiapea tasapind. Pinnase tõus vaia ees on ligikaudu 40 mm. 60 mm paksune ja 400 mm pikkune vai on pinnast nähtavalt deformeerunud kuuekordse paksuse ja terve oma pikkuse ulatuses.



**Joonis 3.16** T-60 esimese koormamise järgsed pinnasemuutused

Võrdluseks 400 mm pikkuse terasest kiilvaia pinnasedeformatsioonidele on 500 mm pikkune 60 mm paksune kiilvai tekitanud pinnases vaiapeast 600 mm kaugusele ulatuvaid pragusid. See on kümnekordne vaiapea paksuse väärtus ja 1,2-kordne vaia pikkuse mõõt (joonis 3.17). Kolmandal koormamisel saadud piirkandevõime väärtuseks on ligikaudu 12 kN ja siire on katse lõpuks üle 80 mm.

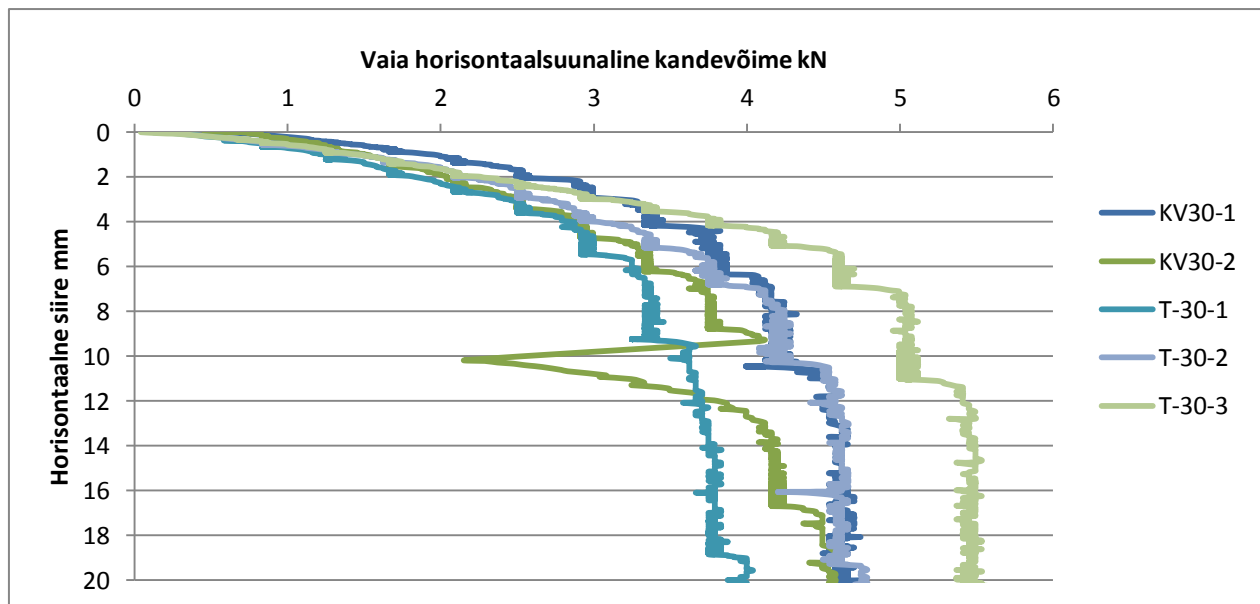


**Joonis 3.17** Kiilvaia T-60-500 kolmanda katsetuse nähtavad pinnasedeformatsioonid

Vaiade katselisel horisontaalsuunalisel koormamisel ettenähtud siirde ületamisel ja pinnase kandevõime raugemisel vabastati katsetalastik ja vaiapea koormusest ning jälgiti elastset pinnasedeformatsiooni. Kiilvaimodelite koormamisejärgne taandumine pinnases oli muutlik. 30 mm paksuse raudbetoonvaia koormamisel saadi elastseks deformatsiooniks 2,27–7,31 mm ja kandevõimete erinevuseks umbes 1 kN. Sama näitaja 60 mm paksuste vaiade korral oli 4,10–9,03 mm kandevõimete erinevuse 2 kN juures. 90 mm paksused vaiad taandusid 4,11–8,07 mm kandevõime erinevuse 3 kN juures. Pikemate vaiade põhjustatud elastne deformatsioon oli 8,13–11,47 mm. Kui pinnas vertikaalsel koormamisel tiheneb vaia kahe kaldtahu suunas, siis horisontaalsel koormamisel annab suurema osa vaia kandevõimest ühe kaldpinna ette jääv pinnas ehk hinnanguliselt pool vaia vertikaalsest kandevõimest.

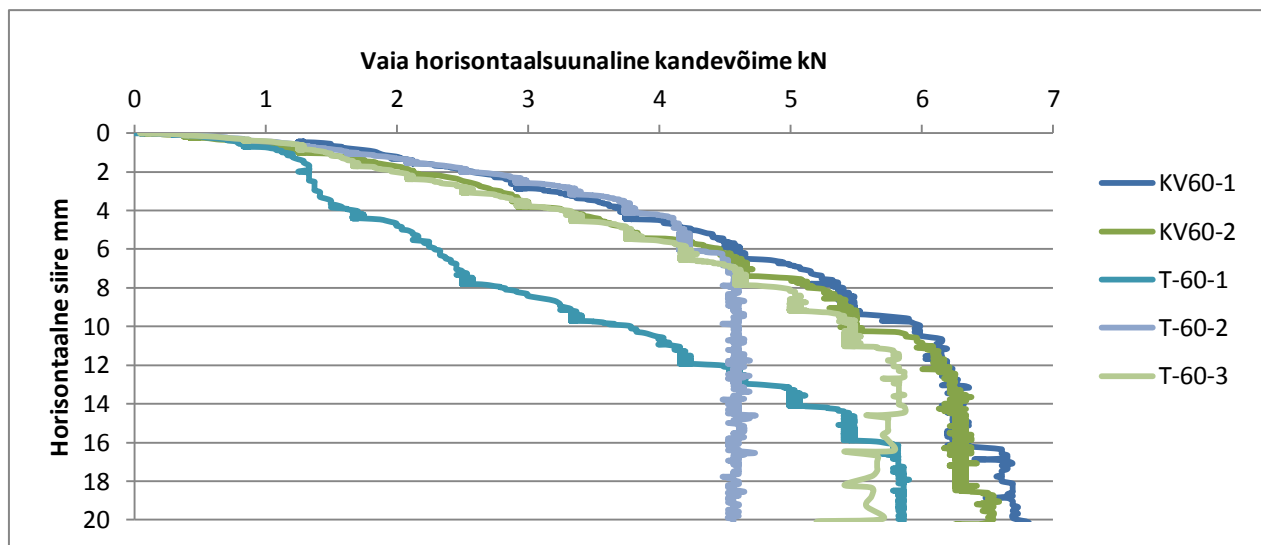
## 4. ARUTELU

Kiivaimodelite horisontaalsuunaline kandevõime sõltub pinnase tüübist ja tihedusest, koormatava vaia suurusest ja vaia materjalist. Katselisel teel sai määratud raudbetoonist ja terasest kiivaimodelite horisontaalsuunalised kandevõimed, leitud erinevused kandevõimetes vaia paksuste muutmise korral ja erinevused kandevõimetes mahult võrdsete vaiade erinevate materjalide vahel. 30 mm paksuste kiilvaiade horisontaalsuunaline kandevõime sõltub eelkõige pinnase tihedusest. Joonisel 4.1 on välja toodud kõigi 30 mm paksuste kiivaimodelite katsetuste tulemused. Suurima ja väikseima kandevõimega on terasest vaiad esimesel ja kolmandal koormamisel. Raudbetoonist kiivaimodelite kandevõime on terasest vaiadega samas suurusjärgus, olgugi et hõõrdenurk liiva ja betooni vahel on suurem kui liiva ja terase vahel.

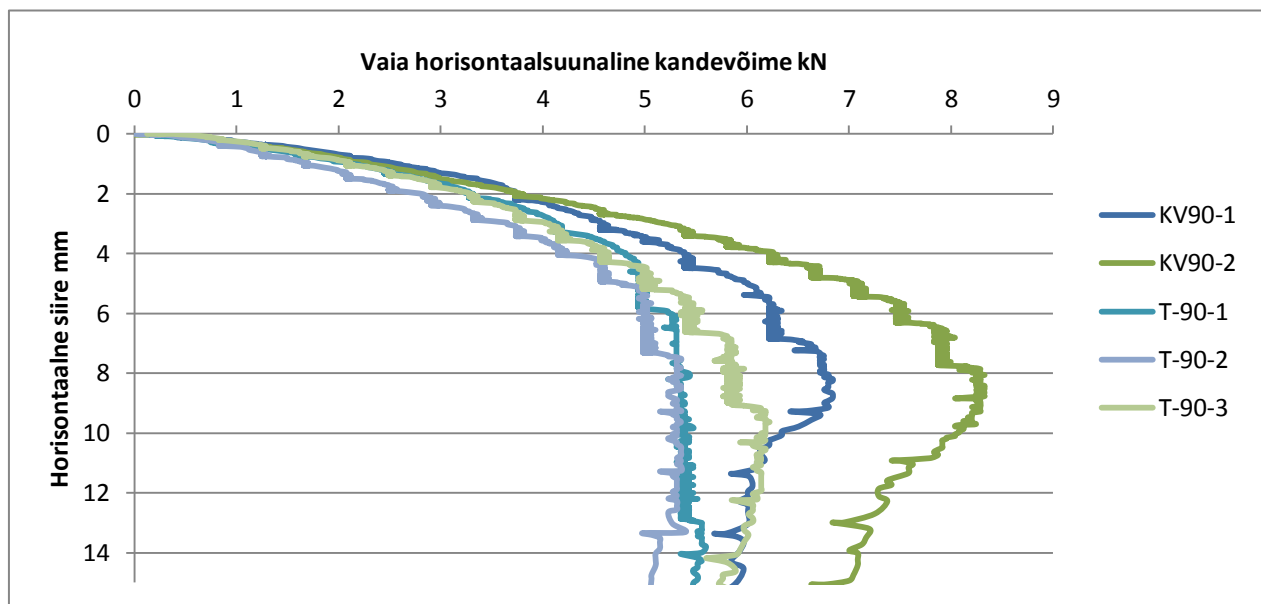


**Joonis 4.1** Horisontaalsuunaliste katsetuste graafikud 30 mm paksuste vaiade koormamisel

Laiemate vaiade korral joonistus välja kandevõimete erinevus raudbetoonist ja terasest vaiade vahel. Terasest vaiamudelid võtsid vastu vähem kui 90 % raudbetoonist vaiamudelite kandevõimest (joonised 4.2 ja 4.3).



**Joonis 4.2** Horisontaalsuunaliste katsetuste graafikud 60 mm paksuste vaiadega



**Joonis 4.3** Horisontaalsuunaliste katsetuste graafikud 90 mm paksuste vaiadega

Vaia paksuse suurendamisel kandevõime hüppeliselt ei suurenenud. Katsejärgse pinnase murenemine näitab külgsuunalisi mõrasid nii kitsamate kui laiemate vaiade ümber, kuid mitte mõrade pikkuse kasvu võrdelisust vaia paksuse kasvuga. Kuna vai kaasab koormamisel pinnast ka külgsuunas, siis vaia paksuse muutudes suurem osa kaasatud pinnast kattub nii kitsama kui



laiema vaia korral kaasatud pinnase suurusega. Katsete graafikutelt ja arvutuslikult leitud andmete põhjal saab väita, et vaia paksuse kahekordne suurendamine ei too kahekordset kandevõime kasvu, sest pinnas, mis töötab vaia koormamisel kaasa, ei suurene vaia mitmekordsel suurendamisel samaväärselt. Vaia horisontaalkandevõime 60 mm paksuse raudbetoon vaia korral on ligikaudu 6 kN. Suurendades vaia mahtu 1,5-kordselt paksusesse on tulemuseks kandevõime tõus väärtuseni 8 kN, ehk horisontaalsuunaline kandevõime suurenemine 33 %. Vaia pikkuse muutmisel on suurem efekt vaia kandevõime muutusesse. Kui vaia muuta mahuliselt samuti 1,5 korda pikkusesse, minnes üle 400 mm pikkuselt vaialt 500 mm pikkusele, saavutatakse kandevõime kasv T-60 vaia 5,5 kN T-60-500 vaia 8 kN. Kandevõime kasv ligikaudu 45 %.

Kõikidel katsetustel jäid pinnasesse nähtavad deformatsioonid vaia paksusest koormamissuunaga risti vähemalt viiekordse kauguseni, andes alust mõttele, et pinnase kandevõime osatähtsuse kiilvaiade horisontaalsuunalises kandevõimes võiks leida pinnase passiivsurvejõu valemi kaudu. Pinnase passiivsurvejõu leidmiseks kasutati Coulombi teooria põhjal välja töötatud valemit 4.1.

$$F_p = 0,5K_p\gamma H^2 B_v, \quad (4.1.)$$

kus  $F_p$  on pinnase külgsurvejõud kN;

$$K_p - \text{külgsurve tegur } K_p = \frac{\cos^2(\varphi + \theta)}{\cos^2 \theta \cos(\delta + \theta) \left[ 1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\phi + \beta)}{\cos(\delta + \theta) \cos(\theta - \beta)}} \right]^2};$$

$\gamma$  – pinnase mahukaal kN/m;

$H$  – vaia pikkus m;

$B_v$  – vaia tinglaid m;

$\varphi$  – pinnase sisehõõrdenurk;

$\theta$  – vertikaali ja vaia kaldpinna vaheline nurk °;

$\delta$  – pinnase ja vaia materjalide vaheline hõõrdenurk;

$\beta$  – maapinna kaldenurk horisontaalist °.

Pinnase külgsurvejõud 400 mm pikkuse ja 60 mm paksuse raudbetoon vaia korral:

$$F_p = 0,5 \frac{\cos^2(32 - 7,43)}{\cos^2(-7,43)\cos(7,43 - 7,43) \left[ 1 - \sqrt{\frac{\sin(32 - 7,43)\sin(32 + 0)}{\cos(7,43 - 7,43)\cos(-7,43 - 0)}} \right]^2} 14,03 \cdot 0,4^2 \cdot (1,5 \cdot 0,06 + 0,5) = 5,47 \text{ kN}$$

Teistele katsetes kasutatud vaiadele mõjuvad külgsurvejõud ja nende arvutamise lähteandmed on antud tabelis 4.1. Arvutuskäigus on kasutatud valemit 4.1.

**Tabel 4.1** Pinnase passiivsurvejõu vahemikud laboris kasutatava liiva maksimaalse ja minimaalse tiheduse juures koos lähteandmetega

Kiilvai	B	$\gamma_{\min}$	$\gamma_{\max}$	H	$B_v$	$\varphi$	$\theta$	$\Phi$	$\delta$	$\beta$	$F_{p,\min}$	$F_{p,\max}$
KV30	0,03	13,54	16,09	0,40	0,545	32,00	-7,43	32,00	24	0,00	5,05	6,01
KV60	0,06	13,54	16,09	0,40	0,59	32,00	-7,43	32,00	24	0,00	5,47	6,50
KV90	0,09	13,54	16,09	0,40	0,635	32,00	-7,43	32,00	24	0,00	5,89	7,00
T-30	0,03	13,54	16,09	0,40	0,545	32,00	-7,43	32,00	17	0,00	3,88	4,61
T-60	0,06	13,54	16,09	0,40	0,59	32,00	-7,43	32,00	17	0,00	4,20	4,99
T-90	0,09	13,54	16,09	0,40	0,635	32,00	-7,43	32,00	17	0,00	4,52	5,37
T-60-500	0,06	13,54	16,09	0,50	0,59	32,00	-7,43	32,00	17	0,00	6,55	7,79

Arvutuses on kasutatud „Ehituskonstruktori käsiraamatus“ pakutud vaia tinglaiuse arvutamise valemit, kui vaia laius on alla 0,8 m, ehk  $B_v = 1,5B + 0,5$  [15]. Arvutustulemuste võrdlus staatilisel koormamisel saadud pinnase kandevõimetega on kujutatud joonistel lisas C. Pinnase kandevõime raugemine toimub arvutatud vahemikus 61 % juhtudest. Arvutus ülehindab kandevõimet 11 % juhtudest ja alahindab pinnase kandevõimet 28 % juhtudest. Minimaalse ja maksimaalse jõu arvutamisel on kasutatud Terzaghi katsetel saadud pinnase minimaalset ja maksimaalset kuivmahumassi, mille põhjal on leitud pinnase minimaalne ja maksimaalne tihedus [14]. Vaia tinglaiuse valemi „Ehituskonstruktori käsiraamatu“ poolt pakutud arvutusmeetod tagab katsetel vaadeldu põhjal minimaalse vaia poolt tihendatava pinnase suuruse, jättes laiemate vaiade puhul ka suurema varu.

Võrreldes arvutuslikul teel kiilvaiale KV60 mõjuvat pinnasesurvejõu valemit olukorraga, kus kiilvaia asemel on püstiste tahkudega samade mõõtudega vai, saame arvutuskäigu:

$$F_p = 0,5 \frac{\cos^2(32+0)}{\cos^2 0 \cos(7,43+0) \left[ 1 - \sqrt{\frac{\sin(32+7,43) \sin(32+0)}{\cos(7,43+0) \cos(0-0)}} \right]^2} 14,03 \cdot 0,4^2 \cdot (1,5 \cdot 0,06 + 0,5) = 5,35 kN$$

Risttahuka kujulise vaia korral on pinnase passiivsurvejõu suurus 98% samade mõõtudega vaiapeaga kiilvaia passiivsurvejõust. Seega võttes kasutusele mahult 78 % suurema risttahukakujulise vaia, loovutatakse horisontaalsuunalise passiivsurvejõu arvelt kaldpinna puudumise tõttu 2 %.

Saamaks katsetes kasutatud kiilvaimodelite ja ehituses kasutuses olevate kiilvaiade horisontaalsuunalises kandevõimes paremat võrdlusmomenti, tuleks kiilvaiade katsetamisel kasutada sarnaseid kinnitusviise ja sõlmede lahendusi hetkel ehituses kasutusel olevate sõlmedega. Ehituses kasutatakse harva üksikut kiilvaia, seega tuleks ka horisontaalkandevõime mudelkatseid teha kiilvaialustega, mille vertikaalsel koormamisel ei ole vaja arvesse võtta koormuse rakendamisel tekkivat kiilvaia pöördumist. Kirjeldatud katse eeldaks ka toimiva ühendussõlme väljatöötamist, mis oleks suuteline pinnases siirduva kiilvaia koormuse vastu võtma.

## KOKKUVÕTE

Kiilvaiade kasutamine on otstarbekas halvema kandevõimega pinnastes, kus kiilvaia kuju ja süvistamisel tekkiv pinnase tihenemine kaasab kandevõimesse rohkem pinnast kui alternatiivsed levinumad vaiatüübid. Kiilvaiade kasutamine vähendab töid kaevikutes ja sellega annab vundamendi rajamisele ajalise võidu. Olgugi et kiilvaiade kandevõimet vertikaalses suunas on katsetatud mitmetel kordadel, on tehtud vaid üksikud katsed horisontaalsuunaliste koormamiste kohta. Kuna varasemalt oldi Maaülikooli konstruktsioonide laboris kiilvaiu uuritud, siis jätkati teema uurimist horisontaalsuunalise koormamise teel. Töötati välja katseskeem, mille alusel sai vaia minimaalsete vertikaalsete siirete ja koormamise juures koormata vaia horisontaalsuunas ja võrrelda saadud tulemusi vaia pinnasesse rammimisel mõõdetud dünaamiliste katsetulemustega. Eesmärgiks oli leida seos kiilvaimodelite vertikaalsuunalise ja horisontaalsuunalise kandevõime vahel. Katsete järel jälgiti ka pinnase käitumist, et hinnata horisontaalsel koormamisel tihenened ja kandevõime suuruses rolli mänginud pinnaseala suurust. Varasemalt on koormatud kiilvaiu teineteisest eemale surumise teel, mis on lubanud vaia pöörlemise pinnases, tekitades vaia keskmise punkti, mille ümber vai pöörleb. Leidmaks vaia küljele mõjuva jõu tegelikku suurust, fikseeriti vai katseseadmete külge viisil, mis ei lasknud vaial pinnases pöörelda. Vai liikus kogu katse jooksul külgtahuga ühtlaselt pinnase suunas. Vaia vertikaalse kandevõime uurimiseks kasutati varem samas laboris sobivaks tunnistatud Gersevanovi valemit, mis vaia dünaamilise koormamise tulemusel andis hinnangulise vertikaalse kandevõime. Kiilvaiadest kasutati viiekordselt vähendatud mudelit, millele loodi laiem, kitsam ja pikem variatsioon, et leida lineaarsus kandevõimete muutumise osas. Eesmärkide saavutamiseks analüüsiti varem läbiviidud uuringuid kiilvaiade teemal, tutvuti vaiade projekteerimiseks mõeldud standarditega ja töötati läbi katseprotokolle. Katsetel kasutati raudbetoonist ja terasest kiilvaiu. Staatilisel koormamisel saadud horisontaalkandevõimete väärtuseid võrreldi samades tingimustes arvutuslikult leitud pinnase passiivsurvejõu suurustega ja hinnati, kas käsiraamatutes pakutud vaia efektiivlause kasutamine on õigustatud ka kiilvaiade projekteerimise korral.

Magistritöö käigus viidi läbi 18 horisontaalsuunas koormamise katset. Katsetulemused näitasid dünaamilisel koormamisel leitud vertikaalkandevõime ja staatilisel koormamisel leitud horisontaalkandevõime proportsionaalsuspiiride vahel 60 % erinevust. Vertikaalsel koormamisel leitud kandevõimest üle poole on pinnas võimeline vastu võtma ka horisontaalsuunalisel koormamisel. Suurim erinevus pinnase käitumisel kahe koormamise vahel esineb piirkandevõime ületamisel. Vertikaalsel koormamisel pinnase kandevõime jätkab ühtlast kasvu vaia süvistamisel, horisontaalsel koormamisel pinnase kandevõime muutub ettearvamatult. Katsete põhjal selgus, et kiilvaimudelite kandevõimesse annab suurema panuse kiilvaia pikkus. Suurendades kiilvaia 125 % pikkuse suunas (mahu suurenemine 150 %), tõuseb kandevõime 145 %. Tehes samas suurusjärgus mahumuutuse paksuse suunas suureneb horisontaalne kandevõime 33 %. Kandevõime suuruse määramisel mängib rolli pinnas, töötades koormamisega ristisuunas kaasa vähemalt viiekordse vaiapaksuse ulatuses, pikemate vaiade korral ka 10-kordse vaiapaksuse ulatuses.

Katsetulemuste kandevõime vahemikke võrreldi arvutuslikul teel pinnase passiivsurvejõu arvutuseks antud valemitega, mis leidsid hea korrelatsiooni. Valemi põhjal arvutatud horisontaalsuunalised kandevõimed olid staatilistel katsetustel tulemuseks saadud kandevõimetega sobilikud 61 % juhtudest, hinnates kandevõimet tegelikust väiksemaks 28 % ja suuremaks 11 % katsetest. Magistritöös teostatud katsetuste tulemused olid rahuldavad.

Kiilvaiade horisontaalsuunalise kandevõime käsitlemisega paralleelselt uuriti ka kiilvaiade vertikaal ja horisontaalsuunalise koormamise ühismõju. Järgmiseks etapiks kiilvaiade kandevõime uurimisel on üksiku kiilvaia paindekandevõime uurimine.

## SUMMARY

The use of wedge shaped piles is adapted to purpose if used in soils with lower bearing capacity. In such cases the shape of the pile and the compressed soil around it play bigger part in the amount of soil used to form the bearing capacity than with other piles. Using wedge shaped piles reduces the time spent in trenches, giving an advantage in constructing the foundations. There has been numerous recent experiments on the vertical bearing capacity of wedge shaped piles, but only numbered experiments on horizontal bearing capacity. Since there have been vertical bearing capacity experiments of wedge shaped piles in Estonian University of Life Sciences laboratories, a decision was made to also start experimenting on horizontal bearing capacities. An experimental schema was proposed, to load the pile horizontally while minimizing vertical loads and displacements. End results were compared to dynamic vertical load tests. The aim of the research was to determine the correlation between vertical and horizontal bearing capacities of the wedge shaped pile. During the experiments, soil behavior was monitored to evaluate the surface area affected by the horizontal loading. Previous horizontal experiments on wedge shaped piles were executed by pushing two piles away from one another, allowing the pile to rotate in soil around its central line. To evaluate the force of resistance from the soil, the pile was locked to the experimental equipment, prohibiting the rotation of the pile. Throughout the experiment piles were forced at a perpendicular angle to the soil. To evaluate the vertical load capacity of the wedge shaped pile the Gersevanov formula, pre-proved in the same laboratory, was used. The main wedge pile model used was a 5 times reduced copy from an actual pile, altered in width and height to compare differences in bearing capacities. Literature related to wedge shaped piles was analyzed in order to achieve the goals. Standards and previous experimental protocols were read up on. Reinforced concrete and steel piles were used as test specimen. Horizontal bearing capacity results obtained in the static tests were compared to calculated dynamic vertical load-bearing capacity and the results were compared to calculated lateral pressure from the soil. The latter was included to evaluate if the soil lateral pressure models are suitable for use in comparison to wedge pile horizontal bearing capacity.

During the master's thesis 18 horizontal loading experiments were executed. The results showed that static horizontal bearing capacity was about 60 % of the dynamic vertical bearing capacity. Meaning that over half of a wedge pile vertical capacity can also be applied horizontally. The biggest difference in the behaviour of the soil appears when the maximum load capacity is exceeded. For vertical load experiments, the bearing capacity increases even after the maximum load is exceeded, but with greater vertical displacements. If maximum load capacity is exceeded in horizontal loading experiments the behaviour becomes unpredictable. The horizontal load experiments also showed, that increasing the length of the wedge pile is more useful than increasing the width. If a wedge shaped pile is lengthened by 125 %, giving it 50 % more volume, the bearing capacity increases to 145 %. If the width of the pile is increased, giving it 150 % original volume, the bearing capacity increases to 133 %. The soil around the pile is visually compressed in a radius of 5 to 10 pile head widths, in the direction of the transition.

The results of the experiments were compared to soil lateral pressure models. 61 % of the experiments results matched the force calculated via Coulomb theory. 28 % of the calculations underestimated the bearing capacity of the soil and 11 % overestimated the bearing capacity of the soil. The results of the experiments were satisfactory.

The combined vertical and horizontal load on wedge shaped piles was experimented on during the experiments of this master's thesis. The next step in wedge shape pile research is single pile experimental loading to determine maximum bending strength of the pile.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Needo, A., Mets, M., Kärk, J., Kuddu, A.-A.** (1991). Kiilvaivundamendid. -*Ehitusgeoloogia kogumik V*. /Toim. Masso, T. Koost. Soonurm, E., Vilo, A. Tallinn. „Valgus“. lk 138-145.
2. **Needo, A.** (1984). Kiilvaivundamendid. – *Konverentsi „VIII Eesti Geotehnika konverents“* teesid. Tallinn. Eesti NSV MN Riikliku Ehituskomitee Geotehnikakomisjon, lk 35.
3. Kiilvaivundamendid. AS Kurmik. [http://www.kurmik.ee/in4\\_kiilvaivundamendid.html](http://www.kurmik.ee/in4_kiilvaivundamendid.html) (18.03.2017).
4. Vaiatööd. Savi AS. <http://savi.ee/#business-segments> (18.03.2017).
5. **Mets, M.** (1977). Vaia kandevõime. - *Ehitusgeoloogia kogumik IV*. /Toim. Olli, V., Vilo, A., Masso, T. Tallinn. „Valgus“. Lk 160-175.
6. **Tammemäe, O., Listra, E., Väli, T., Ong, H.** (1991). Kiilvaiade kandevõime. -*Ehitusgeoloogia kogumik V*. /Toim. Masso, T. Koost. Soonurm, E., Vilo, A. Tallinn. „Valgus“. lk 146-156.
7. **Killar, E., Mets, M., Vares, J.** (1977). Vaia kandevõime määramise võimalustest rammimisandmeil. - *Ehitusgeoloogia kogumik IV*. /Toim. Olli, V., Vilo, A., Masso, T. Tallinn. „Valgus“. Lk 176-182.
8. **Бахолдин, Б.В., Ильичев, В.А., Сорочан, Е.А., Багдасаров, Ю.А., Мамонов, В.М., Мариупольский, Л.Г., Федоровский, В.Г., Экимян, Н.Б., Джантимиров, Х.А., Трофименков, Ю.Г., Шаевич, В.М., Лешин, Г.М., Ханин, Р.Е., Глотов, Н.М., Тюленев, Е.А., Школьников, И.Е.** (1987). СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты.
9. **Mets, M., Tammemäe, O., Väli, T.** (1984). Kiilvaia rõhtkandevõime. – *Konverentsi „VIII Eesti Geotehnika konverents“* teesid. Tallinn. Eesti NSV MN Riikliku Ehituskomitee Geotehnikakomisjon, lk 37.
10. **Mets, M., Smirnov, L., Tammemäe, O., Väli, T.** (1984). Kiilvaia käitumisest pinnases. – *Konverentsi „VIII Eesti Geotehnika konverents“* teesid. Tallinn. Eesti NSV MN Riikliku Ehituskomitee Geotehnikakomisjon, lk 40.
11. **Vares, Erko.** (2015). Kiilvaimodelite kandevõime liivas ja süvistamisel toimuvad pinnasemuutused. (Magistritöö). Tallinna Tehnikaülikool Tartu Kolledž. Säätva tehnoloogia õppetool. Tallinn.
12. **Kaadra, V.** (1987). Kiilvaiade horisontaalkandevõime uurimine Nursi katsepolügoonil. Geoloogilise uurimustöö aruanne. Tartu.
13. **Linde, M.** (2016). Kiilvaia horisontaalkandevõime. Diplomipraktika aruanne. Eesti Maaülikool. Tartu.



14. **Vares, Erik.** (2015). Kiilvaimudelite kandevõime liivas ja süvistamisel toimuvad pinnasemuutused. (Magistritöö). Tallinna Tehnikaülikool Tartu Kolledž. Säästva tehnoloogia õppetool. Tallinn.
15. **Jaanisoo, V.** (2012). Geotehnika. Ehituskonstruktori käsiraamat. /Toim. Masso, T. 3. trükk. Tallinn. Ehitame kirjastus, lk 212-260.
16. **Needo, A., Väli, T., Needo, E., Jaanisoo, V., Kudu, A., Kark, J.** (1986). Kiilvaivundamentide arvutamise, projekteerimise ja ehituse instruksioon VEN 57-86. Tallinn. ENSV Ministrite Nõukogu Riiklik Ehituskomitee.
17. **Tammemäe, O.** (2003). Kiilvaiad Lõuna-Eesti moreenpinnases. (Magistritöö). Tallinna Tehnikaülikool. Energeetikateaduskond. Tallinn.
18. **Russo, G.** (2015). A method to compute the non-linear behaviour of piles under horizontal loading. Soils and foundations. Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering. Federico II University. lk 33-43.

**LISAD**

## Lisa A: Laboripäevik

**Tabel A.1** Laboripäevik

Kuupäev	Kellaeg	Tegevus
13.11.2015	19:30-21:30	Esimese proovikatsetuse tegemine laboris olemasolevate katseseadmete ja materjalidega, ühe keermega kiilvaia KV40/3 pinnasesse rammimine ja horisontaalsuunas koormamine
1.03.2016	16:00-21:00	Esimene katse raudbetoon kiilvaia KV30, tulevaste katsekehade valamine vormi
3.03.2016	10:00-11:30	Kiilvaiade KV 30, KV60 ja KV90 vormide lahtivõtmine ja vette kivistuma panemine
4.03.2016	10:00-14:00	Raudbetoon kiilvaia KV30 teine katsetamine
7.03.2016	11:00-12:30	Raudbetoon kiilvaia KV30 kolmas katsetamine
8.03.2016	10:00-16:30	Raudbetoon kiilvaia KV60 esimene ja teine katsetamine
9.03.2016	11:00-17:30	Raudbetoon kiilvaia KV90 esimene ja teine katsetamine
28.04.2016	19:00-22:30	Terasest kiilvaia T-90 esimene katsetamine
29.04.2016	17:30-20:00	Terasest kiilvaia T-60 esimene katsetamine
1.05.2016	17:30-21:00	Terasest kiilvaia T-30 esimene katsetamine
2.05.2016	18:00-21:30	Terasest kiilvaia T-60-500 esimene katsetamine
3.05.2016	17:30-22:00	Terasest kiilvaia T-90 teine ja kolmas katsetamine
4.05.2016	17:30-22:00	Terasest kiilvaia T-60 teine ja kolmas katsetamine
5.05.2016	17:30-22:00	Terasest kiilvaia T-30 teine ja kolmas katsetamine
6.05.2016	17:30-22:00	Terasest kiilvaia T-60-500 teine katsetamine
7.05.2016	14:00-18:00	Terasest kiilvaia T-60-500 kolmas katsetamine

## Lisa B: Katseprotokollid

**Tabel B.1** KV30 esimese katse protokoll 01.03.2016

Algandmed	Surve bar	Siire mm	Vaste mm	Siire(mm)/ Surve(bar)	Koorm.	1.min	3.min	5.min	10.min
	0,9	43,35	5,5	2	41,35	41,70			
Kaugused vaiapeast mm				3	41,70	41,70			
Ülemine õlg			1720	4	41,82	41,82			
Anduri kaugus			65	5	42,12	42,19	42,22	42,22	
Koormamispunkti kaugus			50	6	42,56	42,66	42,70	42,70	
Pinnasekast			10	7	43,06	43,23	43,31	43,34	43,39
Süvisepõhja pikkus			71	8	43,75	44,05	44,16	44,21	44,26
				9	44,67	45,16	45,34	45,40	45,52
				10	46,05	46,85	47,22	47,43	47,67
				11	49,03	50,06	50,84	51,19	51,78
				12	54,30	58,03	59,99	60,61	62,07
				13	69,34	92,89			
				Lõppnäit	92,89	Taandus	85,58	Elastne	7,31

**Tabel B.2** KV30 teise katse protokoll

Algandmed	Surve bar	Siire mm	Vaste mm	Siire(mm)/ Surve(bar)	Koorm.	1.min	3.min	5.min	10.min
	0,9	14,33	5,75	2	14,33	14,33	14,33		
Kaugused vaiapeast mm				3	14,50	14,56	14,57		
Ülemine õlg			1720	4	15,00	15,13	15,15		
Anduri kaugus			100	5	15,69	15,82	15,86		
Koormamispunkti kaugus			50	6	16,55	16,71	16,76	16,78	
Pinnasekast			15	7	17,43	17,64	17,72	17,76	
Süvisepõhja pikkus			45	8	18,59	18,83	18,92	18,98	19,05
				9	19,83	20,18	20,36	20,42	20,54
				10	21,75	22,39	22,72	22,89	23,10
				11	28,40	29,30	30,02	30,44	31,03
				12	35,30	38,44	42,00	43,64	45,47
				13	52,74	57,43			
				Lõppnäit	62,92	Taandus	60,65	Elastne	2,27

**Tabel B.3** KV60 esimese katse protokoll

Algandmed	Surve bar	Siire mm	Vaste mm	Siire(mm)/ Surve(bar)	Koorm.	1.min	3.min	5.min	10.min
	0,9	53,48	5,44	2	53,48	53,53	53,53		
Kaugused vaiapeast mm				4	53,86	53,93	53,95		
Ülemine õlg			1715	6	54,90	55,00	55,04		
Anduri kaugus			88	8	56,08	56,26	56,31	56,33	
Koormamispunkti kaugus			48	10	57,52	57,82	57,90	57,93	
Pinnasekast			18	12	59,40	59,69	59,81	59,87	59,98
Süvisepõhja pikkus			95	14	61,94	62,32	62,57	62,71	62,83
				16	66,39	67,57	68,38	68,92	69,63
				17	71,60	79,36	92,69		
				Lõppnäit	126,30	Taandus	117,3	Elastne	9,03

**Tabel B.4** KV60 teise katse protokoll

Algandmed	Surve bar	Siire mm	Vaste mm	Siire(mm)/ Surve(bar)	Koorm.	1.min	3.min	5.min	10.min
	0,9	65,65	3,05	2	65,87	65,88	65,89		
Kaugused vaiapeast mm				4	66,60	66,66	66,68		
Ülemine õlg			1715	6	67,60	67,76	67,78		
Anduri kaugus			52	8	69,15	69,35	69,43	69,46	
Koormamispunkti kaugus			43	10	70,74	70,95	71,03	71,06	
Pinnasekast			20	12	72,33	72,68	72,86	72,94	73,04
Süvisepõhja pikkus			87	14	74,83	75,27	75,54	75,67	75,89
				16	79,11	80,66	81,92	82,63	84,14
				Lõppnäit	133,51	Taandus	126,54	Elastne	6,97

**Tabel B.5** KV90 esimese katse protokoll

Algandmed	Surve bar	Siire mm	Vaste mm	Siire(mm)/ Surve(bar)	Koorm.	1.min	3.min	5.min	10.min
	0,8	76,18	2,67	2	76,26	76,26			
Kaugused vaiapeast mm				4	76,55	76,57	76,55		
Ülemine õlg			1720	6	76,91	76,97	76,97		
Anduri kaugus			62	8	77,42	77,49	77,49		
Koormamispunkti kaugus			50	10	78,24	78,34	78,37		
Pinnasekast			15	12	79,16	79,35	79,38		
Süvisepõhja pikkus			76	14	80,27	80,54	80,63	80,65	
				16	81,84	82,41	82,70	82,83	83,02
				17	83,43				
				Lõppnäit	131,14	Taandus	124,49	Elastne	6,65

**Tabel B.6** KV90 teise katse protokoll

Algandmed	Surve bar	Siire mm	Vaste mm	Siire(mm)/ Surve(bar)	Koorm.	1.min	3.min	5.min	10.min
	0,9	39,03	1,67	2	39,13	39,13			
Kaugused vaiapeast mm				4	39,47	39,47			
Ülemine õlg			1717	6	39,91	39,94	39,96		
Anduri kaugus			50	8	40,44	40,52	40,54		
Koormamispunkti kaugus			50	10	41,03	41,09	41,11		
Pinnasekast			20	12	41,59	41,69	41,72		
Süvisepõhja pikkus			77	14	42,25	42,37	42,41	42,43	
				15	42,59	42,72	42,80	42,82	
				16	43,01	43,17	43,22	43,28	43,32
				17	43,47	43,63	43,72	43,77	43,83
				18	43,95	44,19	44,31	44,39	44,46
				19	44,66	44,92	45,09	45,18	45,34
				20	45,54	45,95	46,28	46,47	46,75
				Lõppnäit	88,76	Taandus	81,58	Elastne	7,18

**Tabel B.7** T-30 esimese katse protokoll

Algandmed	Surve bar	Siire mm	Vaste mm	Siire(mm)/ Surve(bar)	Koorm.	1.min	3.min	5.min	10.min
	0,9	0,00	6,33	3	0,66	0,66	0,66		
Kaugused vaiapeast mm				4	1,09	1,20	1,21		
Ülemine õlg			1730	5	1,71	1,89	1,91		
Anduri kaugus			46	6	2,47	2,63	2,66		
Koormamispunkti kaugus			45	7	3,20	3,51	3,58	3,60	
Pinnasekast			0	8	4,51	5,06	5,25	5,32	5,45
Süvisepõhja pikkus			151	9	6,77	8,25	8,70	8,91	9,22
				10	13,97	16,03	17,34	17,98	18,84
				11	27,54	32,24	37,35	40,66	45,19
				12	81,79	96,24			
				Lõppnäit	108,55	Taandus	103,65	Elastne	4,90

**Tabel B.8** T-30 teise katse protokoll

Algandmed	Surve bar	Siire mm	Vaste mm	Siire(mm)/ Surve(bar)	Koorm.	1.min	3.min	5.min	10.min
	0,9	0,00	6,00	3	0,54	0,56			
Kaugused vaiapeast mm				4	0,84	0,92	0,92		
Ülemine õlg			1722	5	1,26	1,33	1,35		
Anduri kaugus			60	6	1,85	1,99	2,02		
Koormamispunkti kaugus			45	7	2,65	2,87	2,91		
Pinnasekast			0	8	3,70	3,91	3,96		
Süvisepõhja pikkus				9	4,66	5,04	5,10	5,15	
				10	5,85	6,33	6,57	6,67	6,81
				11	7,76	9,09	9,67	9,84	10,27
				12	12,33	15,90	16,06	16,85	19,26
				Lõppnäit	81,52	Taandus	77,95	Elastne	3,57

**Tabel B.9** T-30 kolmanda katse protokoll

Algandmed	Surve bar	Siire mm	Vaste mm	Siire(mm)/ Surve(bar)	Koorm.	1.min	3.min	5.min	10.min
	0,9	0,00	5,00	3	0,45	0,49			
Kaugused vaiapeast mm				4	0,83	0,90	0,92		
Ülemine õlg			1719	5	1,29	1,39	1,40		
Anduri kaugus			60	6	1,83	1,94	1,95		
Koormamispunkti kaugus			45	7	2,30	2,40	2,42		
Pinnasekast			0	8	2,80	2,92	2,97		
Süvisepõhja pikkus				9	3,30	3,46	3,52	3,53	
				10	3,87	4,08	4,14	4,17	
				11	4,54	4,86	5,03	5,06	
				12	5,50	6,11	6,47	6,63	6,89
				13	7,30	8,84	9,88	10,38	11,04
				14	12,33	15,98	18,06	19,52	22,18
				Lõppnäit	81,87	Taandus	76,71	Elastne	5,16

**Tabel B.10** T-60 esimese katse protokoll

Algandmed	Surve bar	Siire mm	Vaste mm	Siire(mm)/ Surve(bar)	Koorm.	1.min	3.min	5.min	10.min
	0,9	0,00	3,00	3	0,59	0,68	0,70		
Kaugused vaiapeast mm				5	4,04	4,36	4,40		
Ülemine õlg			1709	7	7,29	7,70	7,78	7,80	
Anduri kaugus			40	9	9,20	9,56	9,67	9,70	
Koormamispunkti kaugus			45	11	11,25	11,64	11,79	11,85	11,93
Pinnasekast			15	12	12,28	12,74	12,83	12,89	12,96
Süvisepõhja pikkus			105	13	13,31	13,80	13,92	14,02	14,11
				14	14,52	15,07	15,41	15,59	15,89
				15	17,18	18,94	25,40		
				Lõppnäit	82,28	Taandus	74,81	Elastne	7,47



**Tabel B.11** T-60 teise katse protokoll

Algandmed	Surve bar	Siire mm	Vaste mm	Siire(mm)/ Surve(bar)	Koorm.	1.min	3.min	5.min	10.min
	0,9	0,00	3,33	3	0,33	0,35			
Kaugused vaiapeast mm				4	0,64	0,68			
Ülemine õlg			1719	5	1,03	1,08			
Anduri kaugus			55	6	1,43	1,52	1,55		
Koormamispunkti kaugus			50	7	1,87	1,98	2,00		
Pinnasekast			15	8	2,34	2,54	2,56		
Süvisepõhja pikkus			105	9	2,91	3,11	3,16		
				10	3,67	3,97	4,08	4,12	
				11	4,83	5,43	5,76	5,87	6,06
				12	7,71	9,80	12,11	13,95	24,88
				Lõppnäit	81,22	Taandus	76,79	Elastne	4,43

**Tabel B.12** T-60 kolmanda katse protokoll

Algandmed	Surve bar	Siire mm	Vaste mm	Siire(mm)/ Surve(bar)	Koorm.	1.min	3.min	5.min	10.min
	0,9	0,00	2,67	3	0,35	0,40			
Kaugused vaiapeast mm				4	0,64	0,80	0,84		
Ülemine õlg			1718	5	1,52	1,66	1,71		
Anduri kaugus			38	6	2,20	2,36	2,38		
Koormamispunkti kaugus			45	7	2,84	3,03	3,07		
Pinnasekast			15	8	3,56	3,71	3,76		
Süvisepõhja pikkus			105	9	4,20	4,43	4,52	4,55	
				10	4,99	5,32	5,43	5,48	
				11	5,95	6,39	6,51	6,56	
				12	7,08	7,48	7,66	7,74	7,85
				13	8,24	8,81	9,00	9,07	9,19
				14	9,60	10,33	10,58	10,75	11,02
				15	12,37	23,87			
				Lõppnäit	81,28	Taandus	77,18	Elastne	4,10

**Tabel B.13** T-90 esimese katse protokoll

Algandmed	Surve bar	Siire mm	Vaste mm	Siire(mm)/ Surve(bar)	Koorm.	1.min	3.min	5.min	10.min
	0,9	0,00	3,00	3	0,29	0,31			
Kaugused vaiapeast mm				5	0,71	0,75	0,76		
Ülemine õlg			1718	7	1,25	1,32	1,33		
Anduri kaugus			58	9	1,97	2,10	2,13		
Koormamispunkti kaugus			50	11	3,00	3,20	3,25	3,28	
Pinnasekast			15	13	4,59	5,24	5,53	5,67	5,84
Süvisepõhja pikkus			116	14	8,76	10,32	11,37	11,96	12,86
				Lõppnäit	82,88	Taandus	74,81	Elastne	8,07

**Tabel B.14** T-90 teise katse protokoll

Algandmed	Surve bar	Siire mm	Vaste mm	Siire(mm)/ Surve(bar)	Koorm.	1.min	3.min	5.min	10.min
	0,9	0,00	3,33	3	0,37	0,40			
Kaugused vaiapeast mm				4	0,67	0,74	0,75		
Ülemine õlg			1725	5	0,97	1,05	1,06		
Anduri kaugus			45	6	1,34	1,48	1,50		
Koormamispunkti kaugus			50	7	1,78	1,87	1,90		
Pinnasekast			15	8	2,18	2,35	2,39		
Süvisepõhja pikkus			116	9	2,69	2,86	2,88		
				10	3,15	3,33	3,39	3,42	
				11	3,83	4,00	4,04		
				12	4,42	4,72	4,86	4,93	
				13	5,43	6,27	6,73	6,94	7,31
				Lõppnäit	80,37	Taandus	73,92	Elastne	6,45

**Tabel B.15** T-90 kolmanda katse protokoll

Algandmed	Surve bar	Siire mm	Vaste mm	Siire(mm)/ Surve(bar)	Koorm.	1.min	3.min	5.min	10.min
	0,9	0,00	3,00	3	0,10	0,13			
Kaugused vaiapeast mm				4	0,32	0,38	0,40		
Ülemine õlg			1719	5	0,59	0,66	0,67		
Anduri kaugus			45	6	0,87	0,94	0,98		
Koormamispunkti kaugus			50	7	1,20	1,29	1,31		
Pinnasekast			20	8	1,58	1,68	1,70		
Süvisepõhja pikkus			116	9	2,02	2,17	2,20		
				10	2,57	2,77	2,81		
				11	3,17	3,36	3,45	3,48	
				12	3,77	4,09	4,15	4,19	
				13	4,52	4,91	5,05	5,10	
				14	5,46	6,03	6,26	6,37	6,55
				15	6,87	7,48	8,01	8,41	8,97
				Lõppnäit	81,65	Taandus	77,54	Elastne	4,11

**Tabel B.16** T-60-500 esimese katse protokoll

Algandmed	Surve bar	Siire mm	Vaste mm	Siire(mm)/ Surve(bar)	Koorm.	1.min	3.min	5.min	10.min
	0,9	0,00	2,33	3	0,27	0,32			
Kaugused vaiapeast mm				4	0,53	0,55			
Ülemine õlg			1713	5	0,75	0,79			
Anduri kaugus			42	6	1,05	1,11	1,13		
Koormamispunkti kaugus			45	7	1,37	1,47	1,47		
Pinnasekast			20	8	1,74	1,83	1,86		
Süvisepõhja pikkus			105	9	2,10	2,20	2,22		
				10	2,43	2,55	2,58		
				11	2,82	2,94	2,97		
				12	3,19	3,31	3,36		
				13	3,62	3,75	3,80		
				14	4,03	4,20	4,26	4,27	
				15	4,48	4,68	4,76	4,78	
				16	4,98	5,23	5,35	5,38	
				17	5,59	5,87	6,00	6,05	
				18	6,24	6,61	6,83	6,92	7,10
				19	7,36	7,92	8,33	8,52	8,89
				20	9,22	10,60	11,72	12,89	15,22
				Lõppnäit	82,13	Taandus	75,47	Elastne	6,66

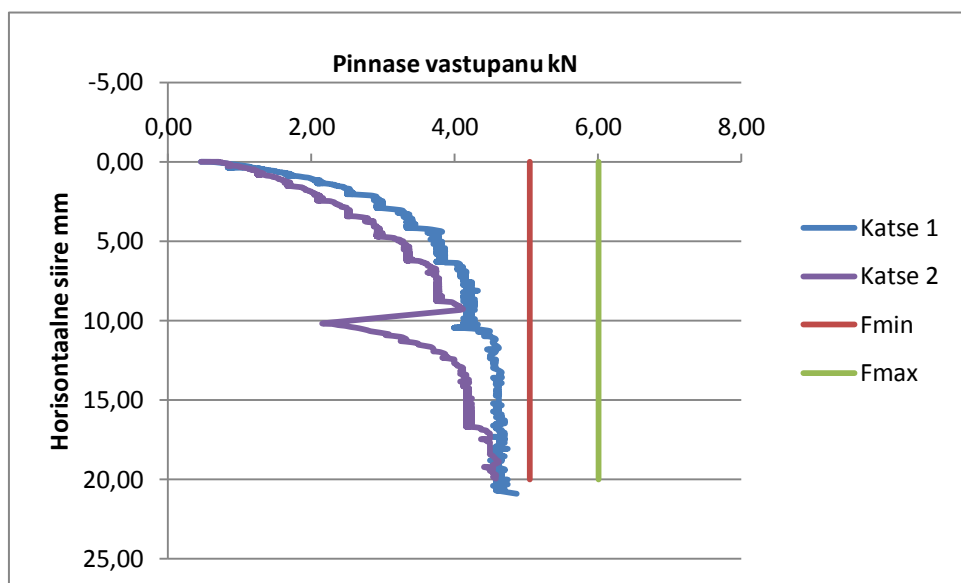
**Tabel B.17** T-60-500 teise katse protokoll

Algandmed	Surve bar	Siire mm	Vaste mm	Siire(mm)/ Surve(bar)	Koorm.	1.min	3.min	5.min	10.min
	0,9	0,00	2,00	3	0,32	0,34			
Kaugused vaiapeast mm				4	0,56	0,64	0,66		
Ülemine õlg			1713	5	0,85	0,95	0,97		
Anduri kaugus			50	6	1,90	2,39	2,50	2,54	
Koormamispunkti kaugus			45	7	3,39	3,78	3,83		
Pinnasekast			20	8	4,79	5,01	5,09	5,14	
Süvisepõhja pikkus			105	9	5,68	6,02	6,11	6,15	
				10	6,58	6,98	7,08	7,13	
				11	7,59	7,96	8,10	8,15	
				12	8,55	8,89	8,99	9,02	
				13	9,36	9,68	9,75	9,80	9,85
				14	10,08	10,44	10,54	10,58	10,64
				15	10,86	11,20	11,29	11,33	
				16	11,64	11,91	12,01	12,06	
				17	12,26	12,61	12,77	12,84	12,92
				18	13,12	13,48	13,61	13,71	13,79
				19	14,00	14,36	14,55	14,62	14,73
				20	14,94	15,28	15,45	15,53	15,67
				21	15,86	16,21	16,39	16,50	16,61
				22	16,86	17,26	17,52	17,60	17,74
				23	17,95	18,34	18,55	18,68	18,86
				24	19,06	19,47	19,70	19,83	20,00
				25	20,18	20,70	20,93	21,06	21,27
				26	21,53	21,88		22,40	22,62
				27	22,98	23,33	23,78	24,02	24,44
				28	24,78	25,38	25,93	26,33	26,93
				29	27,25	28,23	29,58	30,91	37,69
Lõppnäit				81,79	Taandus	69,89	Elastne	11,90	

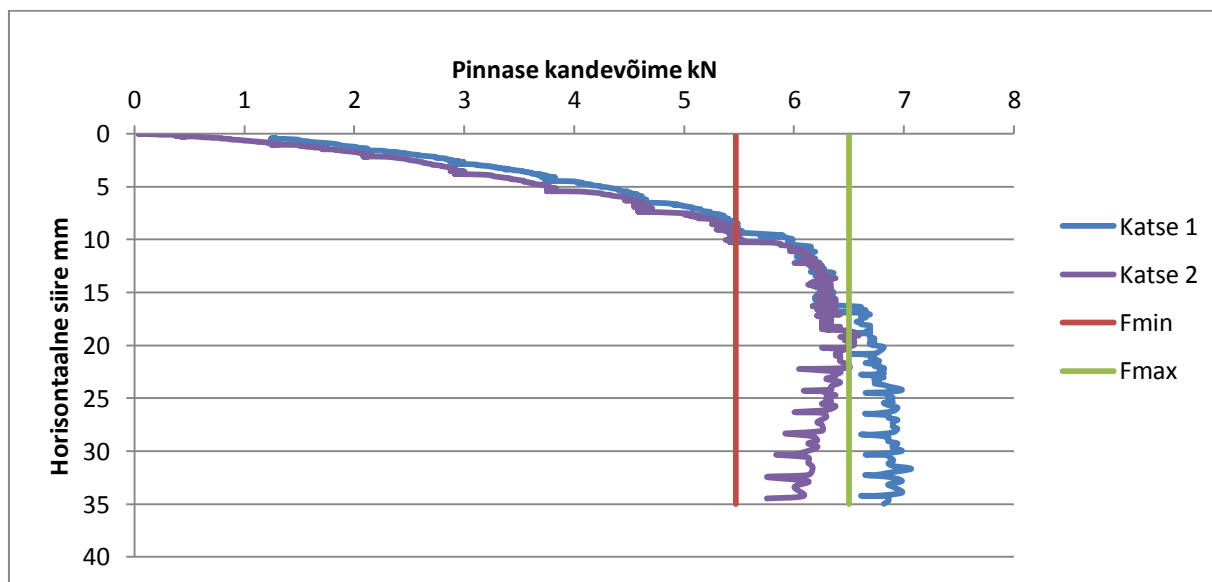
**Tabel B.18** T-60-500 kolmanda katse protokoll

Algandmed	Surve bar	Siire mm	Vaste mm	Siire(mm)/ Surve(bar)	Koorm.	1.min	3.min	5.min	10.min
	0,9	0,00	2,67	3	0,61	0,66			
Kaugused vaiapeast mm				4	1,05	1,08			
Ülemine õlg			1723	5	1,70	1,76			
Anduri kaugus			42	6	5,16	6,70	6,81		
Koormamispunkti kaugus			45	7	7,53	7,75	7,80		
Pinnasekast			20	8	8,52	8,72	8,78		
Süvisepõhja pikkus			105	9	9,28	10,85	11,04		
				10	11,50	11,83	11,90		
				11	12,40	12,74	12,84		
				12	13,28	13,80	13,97	14,05	
				13	14,60	15,38	15,71	15,85	
				14	16,40	17,22	17,40	17,48	
				15	18,03	18,64	18,90	19,04	
				16	19,51	20,28	20,58	20,77	21,11
				17	21,40	22,57	23,06	23,57	24,10
				18	24,42	25,18	25,72	26,01	26,88
				19	27,27	27,85	28,32	28,48	28,72
				20	29,00	29,56	29,80	29,93	30,11
				21	30,34	30,88	31,14	31,27	31,46
				22	31,72	32,37	32,64	32,84	33,08
				23	33,37	33,92	34,43	34,70	35,23
				24	35,51	36,68	38,03	38,76	39,74
				25	40,05	42,31	45,40	46,95	51,55
				Lõppnäit	85,57	Taandus	75,89	Elastne	9,68

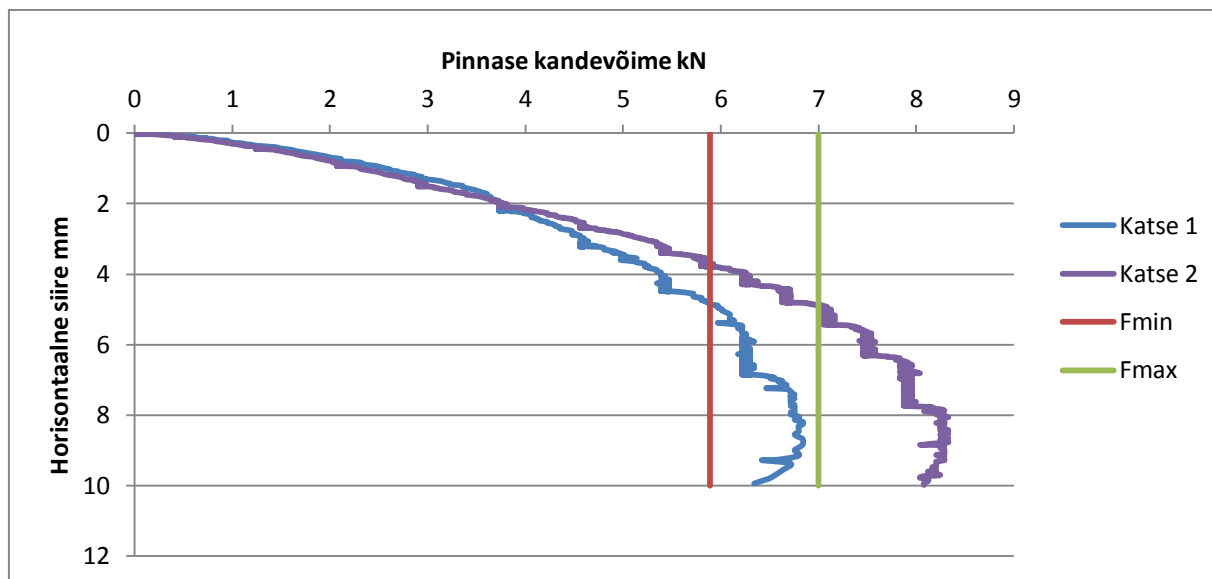
## Lisa C: Horisontaalkoormamise tulemuste võrdlus pinnase passiivsurvejõuga



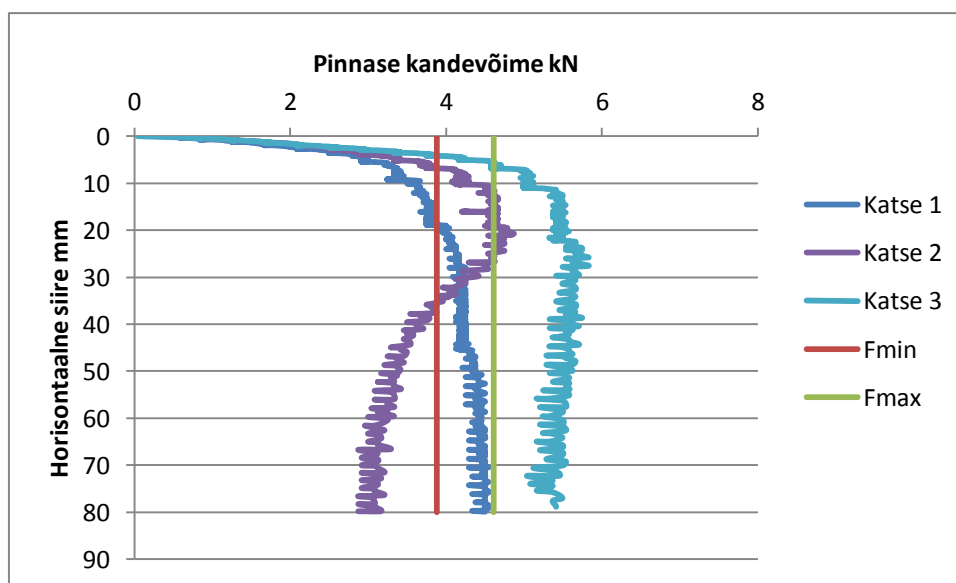
**Joonis C.18** KV30 staatilise koormamise graafiku võrdlus arvutusliku pinnase passiivsurvejõu vahemikuga



**Joonis C.19** KV60 staatilise koormamise graafiku võrdlus arvutusliku pinnase passiivsurvejõu vahemikuga

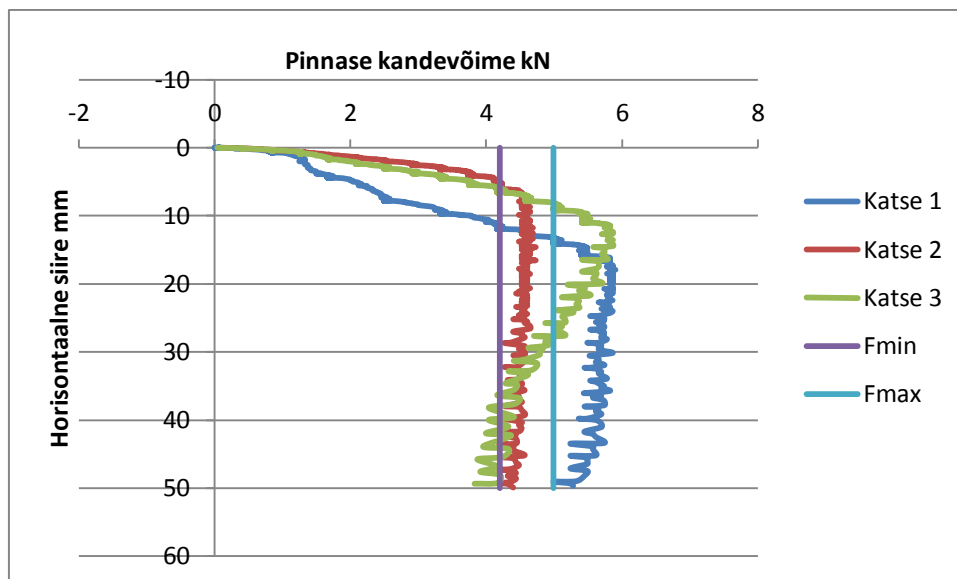


**Joonis C.3** KV90 staatilise koormamise graafiku võrdlus arvutusliku pinnase passiivsurvejõu vahemikuga

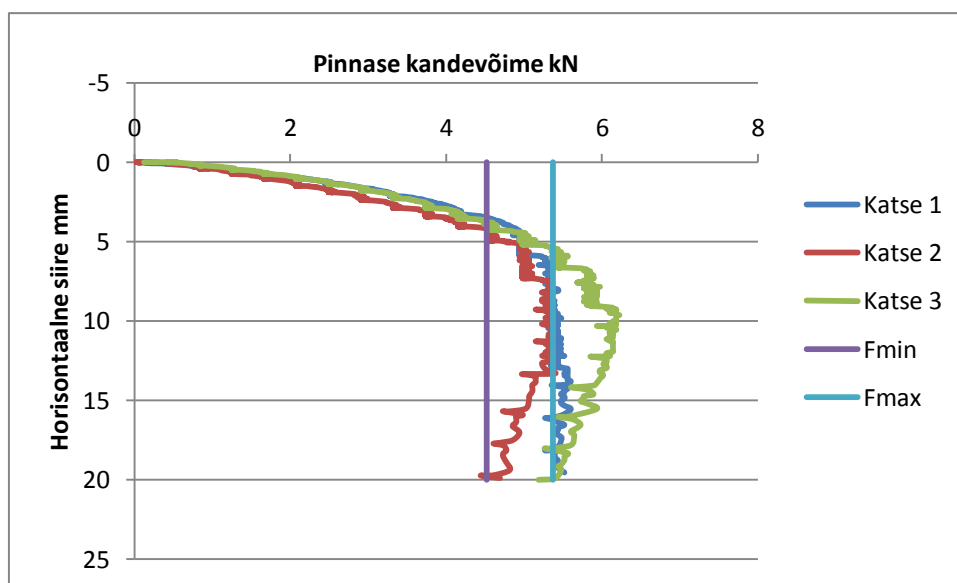


**Joonis C.4** T-30 staatilise koormamise graafiku võrdlus arvutusliku pinnase passiivsurvejõu vahemikuga

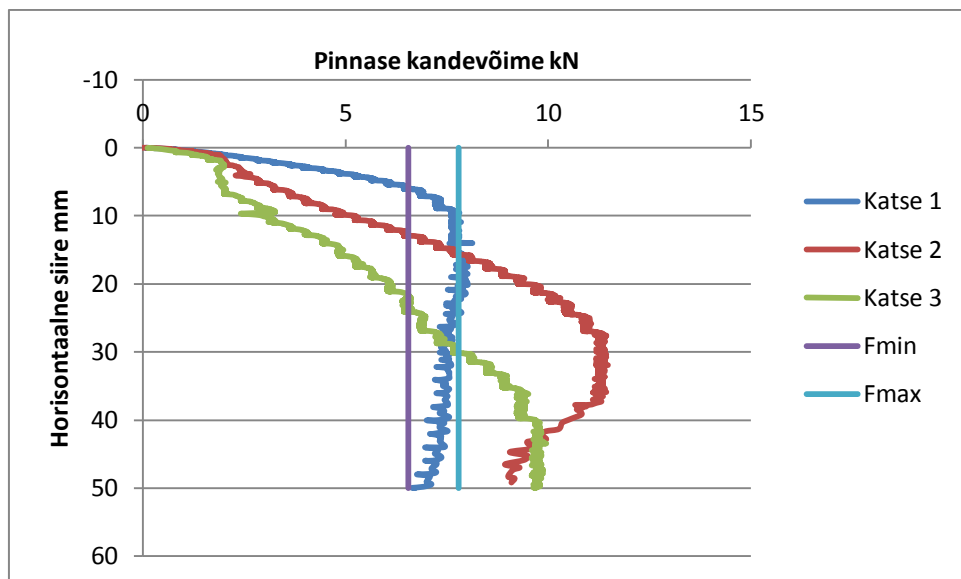




**Joonis C.5** T-60 staatilise koormamise graafiku võrdlus arvutusliku pinnase passiivsurvejõu vahemikuga



**Joonis C.6** T-90 staatilise koormamise graafiku võrdlus arvutusliku pinnase passiivsurvejõu vahemikuga



**Joonis C.7** T-60-500 staatilise koormamise graafiku võrdlus arvutusliku pinnase passiivsurvejõu vahemikuga

## LISA D: Lihtlitsents

### **Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Meelis Linde,

(sünnipäev pp/kuu/aa 11.10.1990)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö

Kiilvaiade horisontaalkandevõime uurimine,

mille juhendaja on Villu Leppik ja Roomelt Needo,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

\_\_\_\_\_

allkiri

Tartu, 22.05.2017

---

### **Juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_

(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_

(kuupäev)

\_\_\_\_\_

(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_

(kuupäev)